



TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta  
Automaatio- ja systeemitekniikan laitos

Juha Backman

## TRAKTORIN JA TYÖKONEEN YHDISTETTY NAVIGOINTI

Diplomityö

Espoo 24.11.2008

Työn valvoja:

Prof. Arto Visala

Työn ohjaaja:

TkT Timo Oksanen

Tiivistelmä

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Diplomityön tiivistelmä

Tekijä: Juha Backman		
Työn nimi: Traktorin ja työkoneen yhdistetty navigointi		
Päivämäärä: 24.11.2008	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 9+78+liit.3
Tutkinto-ohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka		
Valvoja: Prof. Arto Visala		
Ohjaaja: TkT Timo Oksanen		
<p>Tämä diplomityö on tehty osana Farmix-tutkimusprojektia, jonka tavoitteina oli tutkia ja kehittää traktorin ja työkoneen integroitua automaatiota. Tässä työssä on kokeiltu ja kehitetty yhdistettyä traktorin ja hinattavan työkoneen navigointi-järjestelmää, joka käyttää hyväkseen sekä satelliitteihin pohjautuvaa globaalia paikannusjärjestelmää, että lokaalia edellisen työjäljen mittaavaa järjestelmää. Pääpaino työssä on keskittynyt eri polunseurantamenetelmiin. Käytetyt menetelmät olivat malliprediktiivinen säädin ja tähtäyspistemenetelmä.</p> <p>Navigointi-järjestelmä toteutettiin traktorin ja kylvölannoittimen yhdistelmälle käyttäen hyväksi näiden väyläpohjaista ohjausta. Työkoneen ohjaus toteutettiin kylvölannoittimen aisaan lisätyn ohjattavan nivelen avulla. Järjestelmää testattiin pelto-olosuhteissa. Testeissä aisan ohjauksesta osoittautui olevan hyötyä työkoneen hallinnassa. Lisäksi malliprediktiivinen säädin vaikuttaisi toimivan paremmin kuin erillisten säätimien yhdistelmä. Sääolosuhteiden takia kattavia testejä ei päästy tekemään. Työssä kuitenkin todennettiin perusjärjestelmän toimivuus ja saatiin uusia kehiteltäviä ideoita.</p>		
Avainsanat: automaattiohjaus, malliprediktiivinen säätö, navigointi, GPS, maataloustyökoneet		



**Abstract**

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY    Abstract of the Master’s Thesis

Author: Juha Backman		
Name of the thesis: Joined navigation of tractor and implement combination		
Date: 24.11.2008	Language: Finnish	Pages: 9+78+app.3
Degree Program: Automation and Systems Technology		
Supervisor: Prof. Arto Visala		
Instructor: D.Sc. Timo Oksanen		
<p>This thesis has been done as a part of Farmix research project, which aim was to study and develop the tractor and implement integrated automation. Tractor and towed implement joined navigation system was developed and tested in this thesis. The navigation system uses the advantage of both the global positioning system based on satellites and the local positioning system based on driving marks on the field. The main focus at this work has been concentrated on a different path tracking methods. The methods used were model predictive control and target point algorithm.</p> <p>Navigation system was implemented to the tractor and seed drill combination using bus-based guidance. Work machine control was realized using added controllable joint in drawbar. The system functionality was tested in field conditions. Controllable joint proved to be of benefit in implement guidance. In addition, the model predictive control seemed to work better than target point algorithm. Due to weather conditions extensive testing wasn’t possible. Nonetheless, it was verified the basic system functionality and gathered further develop ideas.</p>		
Keywords:    Autopilot, Model Predictive Control, navigation, GPS, agricultural machine		



## Esipuhe

Haluan kiittää kaikkia tämän työn tekemisen mahdollistaneita tahoja; Farmix-projektin tutkijoita sekä projektia tukemassa olleita yrityksiä. Erityisesti suuret kiitokset kuuluvat työn ohjaajalle Timo Oksaselle hyvistä ideoista ja neuvoista. Kiitokset myös työn valvojalle prof. Arto Visalalle. Suuret kiitokset kuuluvat myös Raimo Linkolehdolle työn käytännön toteutuksessa korvaamattomasta avusta sekä Pasi Suomelle ja Jere Kaivosojalle avusta peltotestien suorittamisessa.

Haluan kiittää myös vanhempiani taloudellisesta avusta koko opiskeluaikani sekä puolisoani Annea henkisestä tuesta ja ymmärryksestä.

Otaniemi, 24.11.2008



Juha Backman



## Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	II
Abstract .....	III
Esipuhe .....	IV
Sisällysluettelo .....	V
Symbolit ja lyhenteet .....	VII
1 Johdanto.....	1
1.1 Tutkimuksen tausta.....	1
1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite .....	2
1.3 Tutkimuksen rajaukset.....	3
2 Aikaisempi tutkimus .....	4
2.1 Kaupalliset sovellukset .....	4
2.1.1 John Deere GreenStar 2.....	4
2.1.2 Agco Auto-Guide .....	7
2.1.3 Trimble .....	9
2.1.4 Agrocom.....	10
2.2 Polunseuranta-algoritmit .....	10
2.2.1 Tähtäyspistemenetelmä .....	11
2.2.2 Malliprediktiivinen säädin .....	17
3 Tutkimusaineisto ja – menetelmät.....	24
3.1 Järjestelmä.....	24
3.1.1 Koordinaatistot, tilat ja parametrit.....	24
3.1.2 Traktorin ja työkoneen yhdistelmä.....	26
3.1.3 Paikantamisessa käytetyt mittalaitteet.....	28
3.1.4 Navigointi-järjestelmän sähköiset liitännät .....	30



3.2	Ohjelmisto .....	32
3.2.1	Matlab Simulink.....	32
3.2.2	Simulaattori .....	33
3.2.3	Laiteajurit .....	35
3.3	Menetelmät.....	37
3.3.1	Polun luominen .....	37
3.3.2	Edellisen työjäljen tunnistaminen .....	39
3.3.3	Polunseuranta-algoritmit .....	43
3.3.4	Toimilaitteiden ohjaus .....	53
4	Tulokset .....	54
4.1	Suoran polun seuranta.....	56
4.2	Lähtö jäljen sivusta .....	61
4.3	Väistökoe .....	66
4.4	Jyrkän mutkan seuranta .....	70
5	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	74
VIITTEET .....		76
LIITE 1. Aisan ohjauskulman ratkaisu .....		79
LIITE 2. Kinemaattisen mallin kaavojen ratkaisu .....		81



## Symbolit ja lyhenteet

### Symbolit

$x$	Prosessin tilavektori
$u$	Ohjaussuurevektori
$v$	Mitattujen häiriöiden vektori
$d$	Mittaamattomien häiriöiden vektori
$m$	Prosessin ulostulojen häiriövektori
$y_m$	Mitattujen ulostulojen vektori
$y_u$	Mittaamattomien ulostulojen vektori
$y$	Prosessin ulostulojen vektori
$f$	Prosessin tilansiirtofunktio
$h$	Prosessin mittausfunktio
$A$	Systeemimatriisi, tilan muutoksen riippuvuus edellisestä tilasta
$B$	Ohjausmatriisi, tilan muutoksen riippuvuus ohjauksesta
$C$	Lähtömatriisi, ulostulon riippuvuus prosessin tilasta
$D$	Suoravaikutusmatriisi, ulostulon riippuvuus ohjauksesta
$J$	Malliprediktiivisen säätimen kustannusfunktio
$Q$	Ohjattavan suureen virheen painokertoimet sisältävä matriisi
$R_{\Delta u}$	Ohjaussuureen muutoksen painokertoimet sisältävä matriisi
$R_u$	Ohjaussuureen arvon painokertoimet sisältävä matriisi
$\varepsilon$	Malliprediktiivisessä säätimessä rajoitusten löysennys muuttuja
$V_{\min}^u, V_{\max}^u$	Malliprediktiivisen säätimen ohjaussuureen arvon rajoitusten pehmennyksen suuruuden säätövektori
$V_{\min}^{\Delta u}, V_{\max}^{\Delta u}$	Malliprediktiivisen säätimen ohjaussuureen muutoksen rajoitusten pehmennyksen suuruuden säätövektori
$V_{\min}^y, V_{\max}^y$	Malliprediktiivisen säätimen ulostulojen rajoitusten pehmennyksen suuruuden säätövektori
$p$	Malliprediktiivisen säätimen prediktiohorisontin pituus
$m$	Malliprediktiivisen säätimen säätöhorisontin pituus
$\hat{x}, \hat{x}_d, \hat{x}_m$	Prosessin tilavektoreiden estimaatit
$M$	Kalman-suotimen vahvistusmatriisi
$(x_R, y_R)$	Traktorin taka-akselin paikka YKJ-koordinaatistossa



$\theta$	Traktorin suuntakulma
$\beta$	Traktorin ja työkoneen välisen vapaan nivelen kulma
$\gamma$	Työkoneen ohjattavan nivelen kulma
$L$	Laserskannerin mittaama työkoneen poikkeama
$\alpha$	Traktorin etuakselin pyörien kulma, ohjattava suure
$\dot{\gamma}$	Työkoneen ohjattavan nivelen kulman muutos, ohjattava suure
$v$	Traktorin nopeus, mitattava ohjaussuure
$a$	Traktorin akseliväli
$b$	Työkoneen kiinnityspisteen etäisyys traktorin taka-akselista
$c$	Työkoneen nivelten välisen aisan pituus
$d$	Työkoneen pituus ohjattavan nivelen jälkeen
$l$	Laserskannerin etäisyys takimmaisesta nivelestä
$h$	Laserskannerin asennuskorkeus maanpinnasta
$(x_E, y_E)$	Työkoneen ohjattavan pisteen paikka YKJ-koordinaatistossa
$P_i = (x_{E,new}, y_{E,new})$	Seurattavan polun pisteet YKJ-koordinaatistossa
$\alpha_E$	Seurattavan polun tangentti
$(x_G, y_G)$	Laserskannerin mittauspisteet karteesisessa koordinaatistossa
$(r, \theta)$	Laserskannerin mittauspisteet polaarikoordinaatistossa
<i>plane</i>	Laserskannerin mittaama pellon profiili
<i>mark</i>	Peltoon merkatun jäljen prototyyppi
<i>pos</i>	Pellon profiilista löydetyn jäljen paikka
$(x_F, y_F)$	Traktorin etuakselin paikka YKJ-koordinaatistossa
$(x_T, y_T)$	Tähtäyspisteen paikka YKJ-koordinaatistossa
$\varepsilon$	Tähtäyspistemethodelmässä traktorin suuntausvirhe
$\Delta T$	Työkoneen siirtyä ohjaamattomasta ajolinjasta
$(x_C, y_C)$	Työkoneen kiinnityspisteen paikka YKJ-koordinaatistossa
$(x_D, y_D)$	Työkoneen ohjattavan nivelen paikka YKJ-koordinaatistossa
$(x_E, y_E)$	Työkoneen ohjattavan pisteen paikka YKJ-koordinaatistossa
$\bar{\varepsilon}$	Navigointivirheen keskiarvo
$D(\varepsilon)$	Navigointivirheen keskihajonta
$\sum  \varepsilon $	Navigointivirheen aikasumma
$\sigma$	Laskuaika
$\omega$	Värähtelytaajuus



## Lyhtenteet

CAN	Controller Area Network, tietoliikenneväylä
DGPS	Differential GPS, differentiaalipaikannus
DMU	Dynamic Measuring Unit, traktorin asentoa mittaava laite
ECU	Electronic Control Unit, elektroninen ohjausjärjestelmä
GGA	Global Positioning System Fix Data, NMEA-0183 viestityyppi
GPS	Global Positionin System, maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
ISOBUS	Valmistajien sopima tarkennus ISO 11783 standardiin, joka on maatalouskoneiden ja traktorin väliseen tiedonsiirtoon kehitetty standardi. Myös kaupananimike ISO 11783 mukaisille tuotteille.
ISOBUS luokka	Traktorin ISOBUS ominaisuuksien tarkennus luokitusten avulla
MPC	Model Predictive Control, mallipredikttiivinen säädin
NMEA	National Marine Electronics Association
NMEA-0183	GPS-vastaanottimien datansiirtostandardi
NMPC	Nonlinear Model Predictive Control, epälineaarinen mallipredikttiivinen säädin
PID	Proportional Integral Derivative, yksi säätötekniikan perussäätimistä
QP	Quadratic Programming, matemaattinen optimointiongelma
RS-232	Recommended Standard 232, kahden tietokonelaitteen välinen sarjaliikennemääritys
RS-422	Recommended Standard 422, differentiaalinen sarjaliikennemääritys
RTK	Real Time Kinematic, reaaliaikainen kinemaattinen mittaus
UDP	User Datagram Protocol, Ethernet-verkoissa käytetty yhteyskäytäntö
USB	Universal Serial Bus, tietokoneen oheislaitteiden liittämiseen käytetty sarjaväyläarkkitehtuuri
YKJ	Yhtenäiskoordinaatisto, yksi Suomessa käytössä olevista kartastokoordinaatistoista
VRS	Virtual Reference Station
VTG	Course Over Ground and Ground Speed, NMEA-0183 viestityyppi
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko



# 1 Johdanto

Perinteinen maanviljely on katoamassa ja tilalle on tulossa nk. täsmäviljely kustannusten minimoimiseksi ja työtehon optimoimiseksi. Nykyisissä työkoneissa on myös paljon toimintoja, joita työkoneen ohjaajan on jatkuvasti tehtävä ja seurattava. Onkin luonnollista, että osa toiminnoista automatisoidaan, jotta työkoneen ohjaajalle jäisi tarpeeksi aikaa päätöksentekoon. Yksi jo nyt automatisoiduista tehtävistä on traktorin ohjaaminen. Kuitenkin nykyiset kaupalliset järjestelmät ovat tarkoitettu lähinnä suoran reitin seuraamiseen ja luottavat pääasiassa kalliisiin satelliittipohjaisiin paikannusmenetelmiin. Näiden järjestelmien navigointi- ja paikannusmenetelmissä on vielä kehittämistarpeita.

Tämä diplomityö on tehty osana Farmix-projektia. Farmix (Traktorin ja työkoneiden integroitu automaatio) on Teknillisen korkeakoulun, Helsingin yliopiston, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen sekä Työtehoseuran vuonna 2006 aloitettu kolmivuotinen tutkimusprojekti. Projekti on osin Tekes- ja osin yritysrahoitteinen. Yrityskumppaneita projektissa ovat Valtra Oy, Junkkari Oy, LH Lift Oy, Potila Tuotanto Oy, ProAgria, Tume-Agri Oy, VAMA-Product Oy, Vansco Electronics Oy ja Vieskan Metalli Oy. Farmix-projektin päätavoitteena on selvittää traktorin ja työkoneen integroidun ja syvennetyn automaation toteuttamiseen liittyviä haasteita ja kehittää sen mahdollistavia menetelmiä. [8]

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Kaupan hyllyiltä on jo saatavissa valmiita tuotteita. Suurin osa niistä kuitenkin pitää traktorin oikealla ajolinjalla, mutta ei ota huomioon hinattavan työkoneen kulkemaa reittiä. Työkoneen paikkaa voidaan laskea odometria-perusteisesti kun tiedetään traktorin ohjausliikkeet. Laskennan avulla saatu työkoneen paikka kuitenkin usein poikkeaa todellisesta, sillä pellot voivat olla kaltevia ja pellolla esiintyy luistamista. Lisäksi mallia



on vaikea saada vastaamaan täysin todellisuutta pelto-olosuhteissa. Näiden syiden vuoksi on työkoneessa oltava jokin sen paikkaa mittaava laite. Normaalisti autopiloteissa käytetään traktorin globaalin paikan määrittämiseen satelliittipohjaisia menetelmiä. Myös konenäköön perustuvia menetelmiä on olemassa traktorin lokaaliin paikantamiseen. Tässä työssä on käytetty kuitenkin 2D laserskanneria, jolla työkoneen paikka suhteessa edelliseen työjälkeen tunnistetaan. Peltoon tehdään edellisellä vierekkäisellä vedolla jälki, joka on tunnistettavissa pellon profiilista. Tätä tietoa käytetään GPS-paikkatiedon tarkentamiseen ja työkoneen ohjaamiseen mallipohjaisen säätimen avulla.

## 1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite

Farmix projektisuunnitelmassa määritellään tämän työn osa-alue seuraavalla tavalla:

”Keskeinen tutkimusongelma tässä osiossa on yleisen autopilot-järjestelmän toteuttaminen erilaisissa olosuhteissa ja erilaisissa koneyhdistelmissä. Kaupalliset ratkaisut toimivat hyvin suorilla ajolinjoilla ja ei-hinattavilla työkoneilla tasaisella pellolla. Yleisessä tapauksessa koneyhdistelmässä voi olla vapaita niveliä, pellot voivat olla kaltevia, luisto vaikuttaa ohjaukseen ja lisäksi ei-suorat ajolinjat muuttavat yleisen ongelman huomattavan paljon haasteellisemmaksi. Ongelmaa pyritään ratkaisemaan pääasiassa matemaattisella mallintamisella ja siihen perustuvilla kehittyneillä säätömenetelmillä.” [8]

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut kehittää traktorin ja työkoneen yhdistetty navigointi-järjestelmä siten, että työkone saadaan kulkemaan vierekkäisien ajojen suhteen mahdollisimman tarkasti. Työssä on käytetty lähtökohtaisesti kahta erilaista tapaa navigoinnin toteuttamiseksi: Erilliset säätimet sekä traktorin että työkoneen navigointiin sekä yhdistetty mallipohjainen monimuuttujasäädin sekä traktorin että työkoneen yhteiseen ohjaukseen. Ensin mainittu ilman aisan ohjausta vastaa nykyisten autopilot-järjestelmien navigointialgoritmeja. Sitä on tämän vuoksi käytetty vertailupohjana kahden muuhun navigointimenetelmään, jossa on aisan ohjaus mukana.



### **1.3 Tutkimuksen rajaukset**

Autopilot-järjestelmien toteutus algoritmitasolla voidaan jakaa karkeasti kolmeen osaan: Reitin suunnittelu, polun seuranta ja toimilaitteen ohjaaminen. Tässä työssä on käsitelty jokaista osa-aluetta, mutta pääpaino on keskittynyt polun seurantaan. Reitin suunnittelu itsessään on jo niin haastava ja laaja tehtävä, että tässä työssä on rajoitettu edellisen työjäljen seurantaan. Rajoitus ei kuitenkaan poissulje samojen polunseurantamenetelmien käyttämistä myös muilla tavoin suunnitelluilla reiteillä.

Tutkimuksessa on käytetty navigointijärjestelmän testausalustana traktorin ja hinattavan kylvölannoittimen yhdistelmää. Kylvölannoittimen aisaan on lisätty ohjattava nivel aisan työkonene puoleiseen pätyyn, joten järjestelmässä on kaksi ohjattavaa vapausastetta ja yksi vapaa nivel. Algoritmit on kuitenkin toteutettu siten, että niitä voidaan käyttää myös muiden vastaavanlaisten koneiden ohjaukseen parametreja muuttaen. Samoja periaatteita noudattamalla voidaan myös muun tyyppisille työkoneryhdistelmille luoda vastaavanlainen autopilot-järjestelmä.



## 2 Aikaisempi tutkimus

Olemassa olevan tekniikan katsaus on kaksiosainen. Ensimmäisessä osassa tutkitaan kaupallisia tuotteita ja niiden ominaisuuksia. Toisessa osassa käydään läpi asiasta kirjoitettua kirjallisuutta. Kaupallisista tuotteista yritykset eivät ilmoita minkälaisia algoritmeja ne käyttävät, siksi niiden toimintaa on analysoitu käyttöohjekirjojen ja myyntiesitteiden pohjalta. Kirjallisuuskatsauksessa päähuomio on kiinnitetty käytettyihin algoritmeihin. Myös algoritmien suorituskykyä on analysoitu hieman aiempiin tutkimuksiin pohjautuen.

### 2.1 Kaupalliset sovellukset

Traktorin automaattiseen ohjaukseen saatavilla olevien kaupallisten tuotteiden algoritmit ja ominaisuudet vaihtelevat. Seuraavissa aliluvuissa on käyty läpi muutamien valmistajien tuotteiden ominaisuuksia. Yhteistä niissä kaikissa on, että työkoneen paikka suhteessa edelliseen ajouraan ei mitata millään tavoin. Poikkeuksen tekee Agrocom, jolla on konenäköön perustuva navigointi saatavilla [3]. Kuitenkin tässäkin tuotteessa navigointi suoritetaan traktorille, ei työkoneelle. Trimblellä puolestaan on navigointisovellus myös työkoneelle, mutta tämän paikannus perustuu GPS-signaaliin [27].

#### 2.1.1 John Deere GreenStar 2

John Deeren GreenStar 2 – järjestelmä vaikuttaisi olevan kehittynein kaupallinen maatalouskoneiden automaattiohjaus-järjestelmä. Sen uusin versio (iTEC Pro) yhdistää myös työkoneen ohjauksen osana automaattiohjausta. Tämä tarkoittaa sitä, että toiminnot, jotka käyttäjä päästeessä joutuisi normaalisti käsin tekemään, nauhoitetaan ja järjestelmä toistaa ne automaattisesti joka kerta [15].



Järjestelmä koostuu StarFire iTC GPS-vastaanottimesta, jossa on sisäänrakennettu kal-  
listuksen korjaus, näytöstä ja pyörien ohjausjärjestelmästä. GreenStar 2 -näyttö on myös  
ISOBUS-yhteensopiva virtuaaliterminaali. [13]

Navigoinnissa työkone otetaan huomioon, mutta sen paikkaa ei varsinaisesti ohjata.  
Päisteeseen tultaessa päisteajo aloitetaan työkoneen etureunan saavuttaessa päistealu-  
een reunan. Käännöksessä katsotaan rajoittaako hinattava työkone kääntösädetä vai  
voidaanko ajaa niin jyrkkä käännös kuin traktori kykenee. Järjestelmän osaamat kää-  
nnöstyyppit on lueteltu taulukossa 1. [15]

Taulukko 1. GreenStar-järjestelmän osaamat eri käännös tyyppit [15]

Käännöstyyppi	Kuvaus
Simple Turn	Traktori kääntyy seuraavalle riville suoraan, jos kääntösäde on noin puolet työleveydestä. Käännöstyyppissä pyörät kääntyvät vain toiseen suuntaan.
Extended Turn	Traktori kääntyy seuraavalle riville, mutta kääntösäde on vä- hemmän kuin työleveys, jolloin päädyssä ajetaan rivejä vasten kohtisuoraan.
Light Bulb Turn	Traktori kääntyy seuraavalle, mutta aloittaa kääntymällä pois- päin. Tätä käännöstyyppiä on käytettävä, jos kääntösäde on suurempi kuin työleveys.

Taulukossa 1 lueteltujen käännöstyyppien lisäksi järjestelmä osaa jättää rivejä väliin.  
Käännöstyyppi vastaa tällöin ” Extended Turn”-tyyppiä. Rivien ohittamista ei kuiten-  
kaan voida käyttää nauhoitusmoodissa, jossa on ajettava jokainen rivi järjestyksessään.  
Erilaiset automaattiajomoodit, joita voidaan käyttää, on lueteltu taulukossa 2.



Taulukko 2. GreenStar-järjestelmän käyttämät automaattiajomoodit [15]

Automaattiajomoodi	Kuvaus
Straight Track Mode	Ensin ajetaan käsin suora ajolinja, jonka jälkeen kaikki tulevat ajolinjat kopioidaan ensimmäiseen perustuen.
AB Curve Mode	Käyttäjä nauhoittaa mutkaisen ajolinjan. Jokainen uusi ajolinja generoidaan ensimmäisestä nauhoitetusta ajolinjasta, mutta uudet eivät ole suoria kopioita, vaan mutkien jyrkkyyden muutos otetaan huomioon.
Adaptive Curve Mode	Käyttäjä nauhoittaa mutkaisen ajolinjan. Seuraava ajolinja kopioidaan edelliseen perustuen, joten käyttäjä voi muuttaa ajolinjoja matkan aikana.
Circle Track Mode	Käyttäjä nauhoittaa ympyrän muotoisesta polusta vähintään 10 metriä, jonka jälkeen automaattiohjaus kykenee ajamaan ympyrän sisäpuolisen alueen automaattisesti.

John Deere myy järjestelmää kolmella eri tarkkuudella: AutoTrack RTK, AutoTrack SF2 ja AutoTrack SF1. Laitteistoltaan kaikki edellä mainitut ovat identtisiä, joten ostettua järjestelmää voidaan myöhemmin päivittää tarkemmaksi. Eroavaisuus on käytetyssä paikannussignaalin. AutoTrack RTK vaatii paikallisen tukiaseman korjaussignaalin lähettämiseen, eikä sitä myydä Suomessa. Tämän paikannussignaalin tarkkuus on +/- 2 cm. AutoTrack SF1 ja SF2 käyttävät John Deeren satelliitin kautta lähettämää korjaussignaalia ja ne ovat käytössä Suomessa. Tarkkuudeltaan signaalit ovat +/- 30 cm ja +/- 10 cm. Järjestelmän hintaluokka on lisävarusteena hankittaessa jälkimmäisellä tarkkuudella noin 13 000 euroa (10/2008). [14]

GreenStar -järjestelmän ilmoitetut tarkkuudet ovat GPS-signaalin paikannustarkkuuksia eivätkä kerro suoraan navigointitarkkuutta. Kokonaistarkkuuteen vaikuttavat paikannussignaalin lisäksi nauhoitettu polku, olosuhteet ja ohjelmiston toiminta [14]. Tarkkuuden parantamiseksi maissinpuinnissa järjestelmään on lisätty leikkuupöytään rivin tunnistavat mekaaniset anturit, joiden mittauksen perusteella GPS signaalia korjataan [12].



2.1.2 Agco Auto-Guide

Agco Auto-Guide on samantapainen järjestelmä kuin John Deeren GreenStar. Sen fyysiset elementit ovat: Terminaali, TopDock, ohjaussäädin (engl. Steering Controller) sekä korjauslähde. Terminaali on traktorin hyttiin asennettava käyttöliittymä ja käyttäjälle näkyvä osa järjestelmää. TopDock sisältää GPS-signaalin vastaanottavan antennin sekä traktorin kallistukset tunnistavan anturin DMU:n (Dynamic Measuring Unit). Ohjaussäädin säättää traktorin pyörien kulmia hydraulikan ja pyörien kulmia mittaavan anturin avulla. Korjauslähde on järjestelmän ulkopuolinen osa, joka lähettää GPS-signaalin tarkennussignaalia. [2]

Auto-Guide ei toistaiseksi osaa vielä käännoiksiä. Auto-Guide ottaa huomioon työkonen sijainnin suhteessa traktoriin, mutta ei kykene laskemaan hinattavan työkonen todellista kulkureittiä eikä myöskään ohjaa työkonen toimintaa. Muutoin ominaisuudet vastaavat GreenStar – järjestelmää. Auto-Guiden käyttämät automaattiajomoodit on lueteltu taulukossa 3.

Taulukko 3. Auto-Guide –järjestelmän käyttämät automaattiajomoodit [2]

Automaattiajomoodi	Kuvaus
Wayline	Käyttäjän asettamien navigointipisteiden väli ajetaan suoraan. Vierekkäiset ajolinjat kopioidaan tästä identtisinä kopioina.
CenterPivot	Traktori seuraa ympyrän muotoista polkua.
Contour Wayline	Järjestelmä nauhoittaa ensimmäistä ajolinjaa ajettaessa navigointipisteitä 6 metrin välein. Seuraavat ajolinjat kopioidaan näistä pisteistä. Järjestelmä ottaa kopioinnissa huomioon mutkien jyrkkyyksien muutokset ja hälyttää, jos mutkasta tulee liian jyrkkä.

Paikannuksen tarkkuus riippuu valitusta GPS-signaalin korjauslähteestä. Taulukossa 4 on esitetty saatavilla olevat eri paikannusvaihtoehdot ja niiden ilmoitetut tarkkuudet. Käytännössä vaihtoehtoja on kolme: Alle metrin, desimetrin ja senttimetrin tarkkuudet. Taulukossa esitetyt eri korjaussignaalit ovat saatavilla eri puolilla maapalloa. [1]



Suomessa on saatavilla käytännössä vain HP-korjaus. Koko järjestelmän hinta vuoden käyttöoikeudella maksaa Suomessa noin 19 000 euroa, jonka jälkeen vuosittain noin 1200 euroa riippuen korjaussignaalin tilausajanjakson pituudesta (10/2008).

**Taulukko 4. Auto-Guiden paikannuksen tarkkuuden vaihtoehdot [2]**

Valinta	Korjaus lähde	Staatinen tarkkuus	Toisto-tarkkuus
Reference station, (centimeter)	RTK korjaus. Korjausasema 10 kilometrin säteellä työkoneesta.	2 cm	2 cm
Reference station, (decimeter)	Differentiaali korjaus. Korjausasema 20 kilometrin säteellä työkoneesta.	10 cm	5 cm
OmniSTAR HP	'OmniSTAR High Performance' satelliitin kautta lähetettävä korjaus.	10 cm	5 cm
OmniSTAR XP	'OmniSTAR Extra Performance' satelliitin kautta lähetettävä korjaus.	20 cm – 30 cm	10 cm – 15 cm
OmniSTAR VBS	'OmniSTAR Virtual Reference Station' satelliitin kautta lähetettävä korjaus.	80 cm	20 cm
WAAS	'Wide Area Augmentation System'. Ilmainen satelliittipalvelu Yhdysvalloissa ja Kanadan etelä osissa.	100 cm	25 cm
CDGPS	'Canada-Wide DGPS sub-meter accuracy'. Ilmainen satelliittipalvelu Kanadassa ja Yhdysvaltojen pohjoisosissa.	100 cm	25 cm
EGNOS	'European Geostationary Navigation Overlay System' Ilmainen satelliittipalvelu Euroopassa.	100 cm	25 cm

Taulukossa 4 ilmoitettu staatinen paikannustarkkuus on valmistajan mittaama GPS-signaalin hajonta. Toistotarkkuus on estimoitu traktorilla tehdyillä mittauksilla ja sisältää näin ollen myös ohjauksesta aiheutuvat virheet. [2]



### 2.1.3 Trimble

Trimblellä on tuotevalikoimassaan useita erilaisia autopilottivaihtoehtoja. Parhain lopputulos hinattavilla työkoneilla saadaan AgGPS Autopilot ja AgGPS TrueTracker tuotteiden yhdistelmällä.

AgGPS Autopilot on traktorin autopilotti. Se koostuu AgGPS vastaanottimesta, AgGPS NavController II säätimestä, pyörien ohjausventtiilistä sekä AgGPS FieldManager näytöstä. GPS:n korjaussignaali vaihtoehdot ovat pääosin samoja kuin taulukossa 4 esitetyt Auto-Guiden korjaussignaalit. AgGPS Autopilot toimii myös itsenäisenä järjestelmänä, jolloin työkoneen oletetaan seuraavan samaa jälkeä traktorin kanssa. [27]

AgGPS TrueTracker koostuu muutoin samoista osista kuin AgGPS Autopilot, mutta työkoneita ohjataan erityisellä sen taakse kiinnitettävällä ohjaimella AgGPS TrueTracker-laitteella. Työkoneen taakse kiinnitettävä ohjain sisältää AgGPS vastaanottimen, NavController II säätimen sekä hydraulisesti ohjatut ohjauspyörät. Kuvassa 1 on piirros laitteen mekaniikasta. TrueTracker – järjestelmän ansiosta työkone saadaan kulkemaan samaa reittiä traktorin kanssa myös rinteissä ja mutkissa. [27]



Kuva 1. AgGPS TrueTracker työkoneen ohjauslaite [27]

Molemmat järjestelmät käyttävät samaa traktorin hyttiin sijoitettavaa näyttöä ja järjestelmien toiminta on yhdistetty. Kuitenkin molemmat laitteet navigoivat itsenäisesti oman paikannussignaalin avustamana.



#### 2.1.4 Agrocom

Myös Agrocomilla on tuotevalikoimissaan useita erilaisia autopilottivaihtoehtoja. Mielinkiintoisin tuote on DUO-Drive, joka yhdistää Agrocomin kaksi erillistä tuotetta: E-Drive ja EYE-Drive. E-Drive on perinteinen GPS-pohjainen navigointijärjestelmä, jota voidaan käyttää myös itsenäisesti. EYE-Drive on stereokameraan pohjautuva paikallinen navigointijärjestelmä. Myös tätä tuotetta voidaan käyttää itsenäisesti. EYE-Drive tunnistaa pellosto aiemmin ajetun ajojäljen (esim. ruiskutusura), kasvirivin (esim. mansikka) tai penkin (esim. peruna) keskikohdan  $\pm 3\text{--}5$  cm tarkkuudella ja ohjaa traktoria tämän mukaan kasveja suojellen. Valmistaja ei kuitenkaan ilmoita miten DUO-Drive yhdistää kaksi erilaista paikannussignaalia toisiinsa. [3]

## 2.2 Polunseuranta-algoritmit

Kaupallisten tuotteiden algoritmien toteutusta ei voida kuin arvailla. Tämän vuoksi on tutkittava alan kirjallisuutta päästäkseen selville miten nykyiset polunseuranta-algoritmit toimivat.

Algoritmeja polunseurantaan on tutkittu ja kehitetty jo pitkään. Erilaisia geometrisia lähestymistapoja ovat esimerkiksi “pure-pursuit” [4] ja “vector pursuit” [30]. Näille yhtenäistä on ns. tähtäyspisteen käyttäminen. Halutulta polulta otetaan tietyn nopeudesta riippuvan matkan päästä tähtäyspiste, johon pyritään pääsemään. Kaavat miten ohjaussuure saadaan tähtäyspisteestä ja ajoneuvon nykyisestä paikasta vaihtelevat.

Viime aikoina on kehitetty myös toisenlaisia lähestymistapoja, jotka ottavat huomioon seurattavan polun pidemmältä matkalta. Tällöin on ennustettava ajoneuvon tulevaa sijaintia ajassa eteenpäin. Tämän tyyppistä säädintä kutsutaan yleisesti malliprediktiiviseksi säätimeksi. Malliprediktiivistä säädintä ovat käyttäneet omissa tutkimuksissaan esimerkiksi Lenain et al. [17] sekä Vougioukas [28].



Suurin osa polunseuranta algoritmeista on kehitelty ainoastaan yhdelle ajoneuvolle. Tilanne mutkistuu huomattavasti, jos ohjattavana onkin hinattava ajoneuvoyhdistelmä. Astolfi et al. [5] ovat tutkimuksessaan kehittäneet Lyapunov-pohjaista polunseuranta-algoritmia traktorille ja työkoneelle. Astolfi et al. ovat jakaneet polunseuranta-ongelman neljään eri tapaukseen: suoran polun seuranta ja ympyrän seuranta sekä eteenpäin että taaksepäin. Ohjattavana pisteenä on traktorin taka-akselin keskipiste. Tutkimuksen tuloksena oli neljä erilaista epälineaarista traktorin etupyörien kulmien säätölakia, joissa erosuureena käytettiin traktorin kohtisuoraa etäisyyttä seurattavasta polusta sekä traktorin suuntausvirhettä. Työkoneen paikkaa ei sinänsä käytetty ohjaukseen.

Myös Bolzern et al. [7] on käsitellyt hinattavan yhdistelmän navigointia. Heidän tutkimuksessaan lähtökohtana oli luoda ohjattavasta yhdistelmästä vastaavalla tavalla käytäytyvä ”haamuyhdistelmä”, jossa työkoneen kiinnityspiste on ohjattavan ajoneuvon taka-akselin keskipisteessä. Tämän jälkeen haamuyhdistelmän kinematiikka voitiin eksaktisti linearisoida ja tälle johtaa takaisinkytkentälaki. Myös tässä tutkimuksessa on rajoitettu ympyrän ja suoran polun seurantaan. Näitä tutkimuksia ei kuitenkaan enempää tässä työssä käsitellä niiden erilaisen ongelmanasettelun vuoksi. Tässä diplomityössä tarkoituksena on ohjata työkoneen paikkaa ja yhdistelmän geometria muuttuu ohjattavan nivelaian takia. Nivelaian ansiosta myös ohjattavia vapausasteita on kaksi.

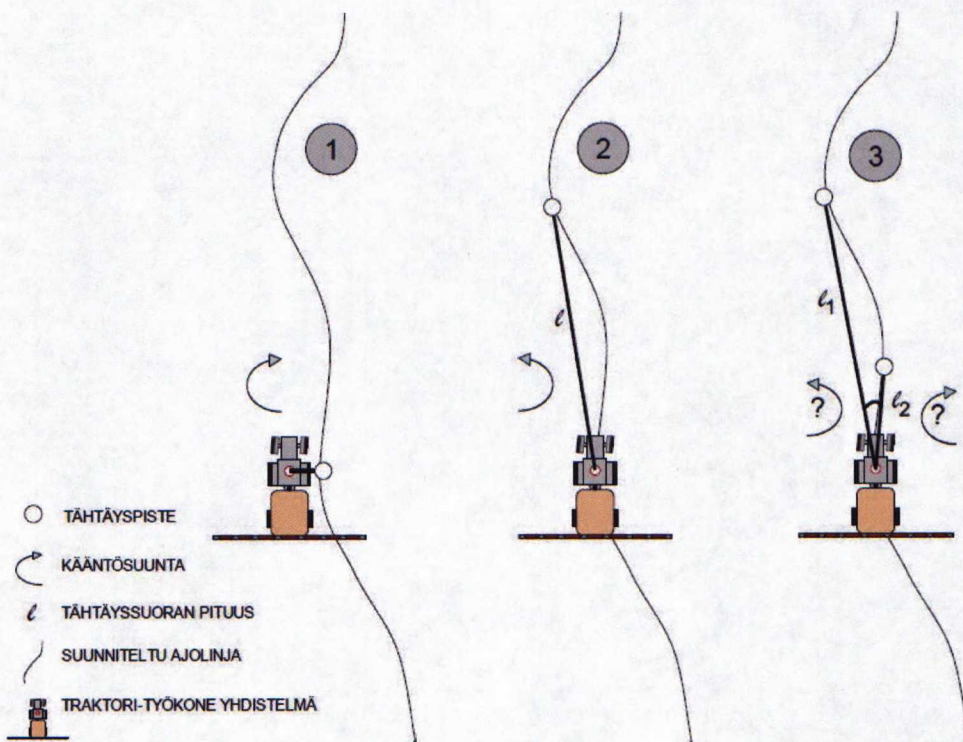
Tässä tutkimuksessa on kokeiltu kahta erilaista menetelmää polun seurantaan: tähtäyspistemenetelmää ja malliprediktivistä säädintä. Nämä edustavat kahta erilaista lähestymistapaa polun seurantaan. Seuraavissa aliluvuissa käsitellään näitä kahta erilaista säädintyyppiä.

### 2.2.1 Tähtäyspistemenetelmä

Kuva 2 havainnollistaa tähtäyspisteen valintaa ja sen merkitystä ohjaussuureen laskentaan. Yksinkertaisin tapa ohjauksen laskentaan on käyttää kohtisuoraa etäisyyttä polusta (kuvan 2 tilanne 1). Tällöin kuitenkin jo pienilläkin lähtöpoikkeamilla seurattavasta



polusta tuloksena voi olla mutkittelua. Asettamalla tähtäyspiste tietyllä etäisyydelle traktorista, voidaan tulevia muutoksia ennakoida (kuvan 2 tilanne 2). Liian suuri etäisyys aiheuttaa kuitenkin oikaisua mutkissa. Menetelmää on edelleen kehitetty käyttämällä kahta tähtäyspistettä (kuvan 2 tilanne 3). Lähempää tähtäyspistettä käytetään normaalisti traktorin ohjaukseen ja kauimmaisella tarkkaillaan polun tulevia muutoksia. Jos tähtäyspisteiden kulmat eroavat liikaa toisistaan, käytetään kauimmaista ohjauksen laskentaan. [16]



Kuva 2. Erilaisia tähtäyspisteen etäisyyden vaihtoehtoja: 1. Kohtisuora etäisyys polusta, 2. Kiinteän matkan päässä oleva tähtäyspiste, 3. Kaksi kilpailevaa etäisyyttä [16]

Tässä työssä käytetty tähtäyspistemenetelmä on hyvin samantapainen kuin aikaisemmin mainituissa geometrista lähestymistapaa käyttävissä polunseurantamenetelmissä [4][30]. Näitä lähestymistapoja on käsitelty hieman tarkemmin seuraavissa aliluvuissa.



### 2.2.1.1 Pure-pursuit

”Pure-pursuit”-menetelmän lähestymistapa perustuu kaarteiden laskemiseen tähtäyspisteiden ja nykyisen sijainnin välille. Kaarretta ei koskaan seurata loppuun, vaan tähtäyspiste pidetään vakioetäisyydellä ja kaarre lasketaan jokaisella askeleella uudelleen. Kaarteen säteen käänteisluku, eli curvature, lasketaan kaavan 1 mukaisesti tässä menetelmässä. [4]

$$\gamma = \frac{2x}{x^2 + y^2} \quad (1)$$

, jossa  $\gamma$  uusi laskettu curvaturen arvo,  $x$  tähtäyspisteen sivusuuntainen etäisyys ja  $y$  kohtisuora etäisyys. Käyttäen vakioetäisyydellä ( $l$ ) olevaa tähtäyspistettä curvaturen laskenta yksinkertaistuu kaavan 2 mukaiseksi. [4]

$$\gamma = \frac{2}{l^2} x \quad (2)$$

Tämä on itse asiassa P-säädin, jonka erosuureena on sivusuuntainen etäisyys ja vahvistuksena  $\frac{2}{l^2}$ . [4]

Amidi on tutkimuksessaan käsitellyt myös monimutkaisempia tapoja ohjauksen laskemiseen tähtäyspisteestä, mutta oheinen todettiin kaikkein parhaimmaksi. Syyksi tutkimustuloksiin todettiin ”pure-pursuit”-menetelmän helppo ja intuitiivinen virittäminen. [4]

### 2.2.1.2 Vector pursuit

”Vector pursuit”-lähestymistapa eroaa edellisestä siinä, että tässä tavassa otetaan tähtäyspisteen paikan lisäksi huomioon haluttu orientaatio kyseisessä paikassa. Halutun orientaation oletetaan olevan seurattavan polun tangetti kyseisessä pisteessä.

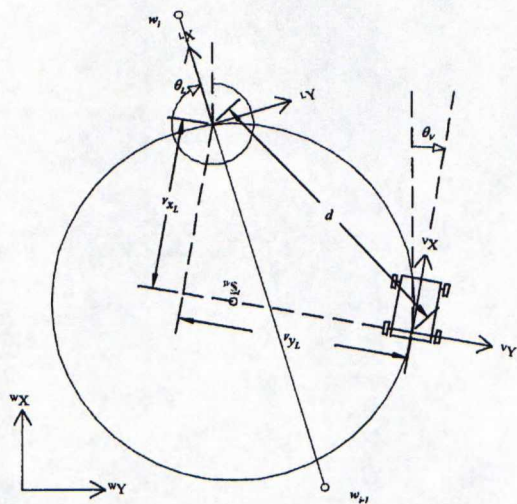
”Vector pursuit”-lähestymistavassa ohjauksen laskenta perustuu ruuviteoriaan (engl. Screw theory). Paikan ja suuntauksen muutoksille tehdään omat ruuvinsa  $\$_l$  ja  $\$_r$ .



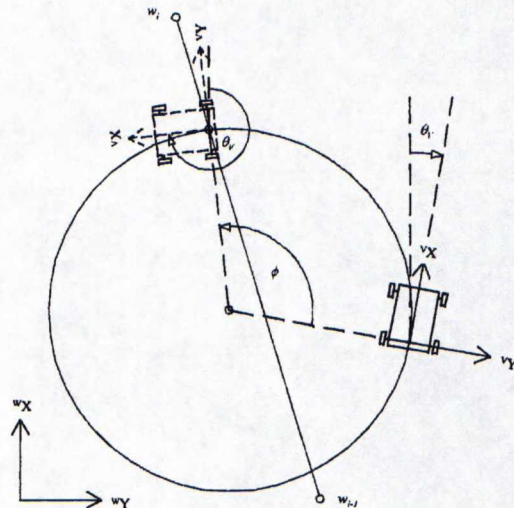
Nämä on määritelty maailmankoordinaatistossa kaavoissa 3 Plücker vektoreina (Plücker vektoreista lisää lähteessä [29]). [30]

$$\begin{aligned} {}^w\mathcal{S}_t &= k_t(0,0,1; {}^w y_v + \frac{d^2}{2^v y_L} \cos(\theta_v), -{}^w x_v + \frac{d^2}{2^v y_L} \sin(\theta_v), 0) \\ {}^w\mathcal{S}_r &= k_r(0,0,1; {}^w y_v, -{}^w x_v, 0) \end{aligned} \quad (3)$$

, joissa  $k_t$  ja  $k_r$  ovat painokertoimia,  $d$  etäisyys tähtäyspisteeseen,  $({}^v y_L, {}^v x_L)$  tähtäyspisteen paikka ajoneuvon koordinaatistossa sekä  $({}^w y_v, {}^w x_v, \theta_v)$  ajoneuvon paikka ja orientaatio maailmankoordinaatistossa. Paikan muunnoksen ruuvin keskipisteeksi on valittu sellaisen ympyrän keskipiste, joka kulkee ajoneuvon nykyisen paikan ja tähtäyspisteen paikan kautta. Ruuvin sijainti on havainnollistettu kuvassa 3. Suuntauksen ruuvin keskipisteeksi on valittu ajoneuvon nykyinen paikka, joten tämä ruuvi sisältää ainoastaan ajoneuvon pyörimisliikkeen, ei liikkumista. Paikan muunnoksen ruuvi sen sijaan sisältää myös pyörimisliikettä, kuten kuvassa 4 havainnollistetaan. [30]



Kuva 3. Paikan muutoksen ruuvi [30]



Kuva 4. Paikan muutoksen ruuvista aiheutuva pyörimisliike [30]



Jos tähtäyspiste on suoraan ajoneuvon edessä, muuttuu paikan ruuvi kaavan 4 mukaiseksi. [30]

$${}^wS_t = k_t(0,0,0; \frac{{}^w x_L - {}^w x_v}{d}, \frac{{}^w y_L - {}^w y_v}{d}, 0) \quad (4)$$

Haluttu hetkellinen haluttu ruuvi saadaan laskemalla paikan ja suuntauksen ruuvit yhteen. [30]

$${}^wS_d = {}^wS_t + {}^wS_r \quad (5)$$

Painokertoimien  $k_t$  ja  $k_r$  suhde voidaan laskea, kun tiedetään kuinka paljon tarvitsee edetä päästäkseen tähtäyspisteeseen sekä kääntyä saadakseen halutun orientaation. Lopputuloksena saadaan hetkellisen ruuvin keskiviivan koordinaateiksi maailmankoordinaatistossa kaavan 6 mukaiset yhtälöt, kun tähtäyspiste ei ole suoraan ajoneuvon edessä. [30]

$$\begin{aligned} {}^w x_{s_d} &= {}^w x_v - \frac{k\phi}{(k-1)\phi + (\theta_L - \theta_v)} \left( \frac{d^2}{2^v y_L} \sin(\theta_v) \right) \\ {}^w y_{s_d} &= {}^w y_v - \frac{k\phi}{(k-1)\phi + (\theta_L - \theta_v)} \left( \frac{d^2}{2^v y_L} \cos(\theta_v) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

, jossa  $\phi$  on kaavan 7 mukainen.

$$\phi = \text{atan} 2((2^v y_L^2 - d^2), (2^v x_L^v y_L)) - \text{atan} 2\left(\frac{d^2}{2^v y_L}, 0\right) \quad (7)$$

Jos tähtäyspiste on suoraan ajoneuvon edessä, hetkellisen ruuvin keskiviivan koordinaatit ovat kaavan 8 mukaiset. [30]

$$\begin{aligned} {}^w x_{s_d} &= {}^w x_v - k \left( \frac{{}^w y_L - {}^w y_v}{\theta_L - \theta_v} \right) \\ {}^w y_{s_d} &= {}^w y_v - k \left( \frac{{}^w x_L - {}^w x_v}{\theta_L - \theta_v} \right) \end{aligned} \quad (8)$$



Haluttu ohjaussuure saadaan näistä muuttamalla hetkellisen ruuvien keskiviivan koordinaatit ajoneuvon koordinaatistoon ja laskemalla tästä haluttu curvaturen arvo. [30]

Oleellista tämän tutkimuksen tuomisessa esiin oli se, että samoista lähtökodista liikkeelle lähdettäessä voi lopputuloksena olla hyvin erilaiset tavat laskea ohjaussuureen arvo. ”pure-pursuit”-menetelmässä lopullisena tapana oli yksinkertainen P-säädin, kun taas ”vector pursuit”-menetelmässä monimutkaiset geometriset kaavat. Molemmissa kuitenkin otetaan huomioon vain tietyn etäisyyden päässä oleva tähtäyspiste.

### 2.2.1.3 Menetelmän suorituskyky

Wit on tutkimuksessaan [30] vertaillut eri tähtäyspistemenetelmien suorituskykyä. Hänen tutkimuksessaan kehitetty ”vector-pursuit”-tapa osoittautui kaikkein robusteimmaksi tähtäyspisteen etäisyyden suhteen sekä nopeuden suhteen. Hän teki testiajoja U:n muotoisilla sekä kahdeksikon muotoisilla poluilla 2, 3 ja 4 m/s nopeuksilla. Testiajoneuvona oli mönkijän päälle rakennettu laitteisto.

Navigointivirheen keskihajonta oli U:n muotoisella polulla kaikilla testatuilla tähtäyspisteen etäisyyksillä 2 m/s nopeudella alle 0.2 m käyttäen ”vector-pursuit”-menetelmää. Muilla menetelmillä toiminta muuttui epästabiiliksi, kun tähtäyspisteen etäisyys oli vähemmän kuin 4 m. Kun menetelmät toimivat stabiilisti, ei kuvaajista voi lukea selkeää eroa keskihajonnoissa. Vastaavassa testissä ”vector-pursuit”-menetelmän suuntavirheen keskihajonta oli alle 5 astetta. Kuvaajien mukaan keskihajonnat eivät oleellisesti muuttuneet nopeuden noustessa.

Kahdeksikon muotoisella radalla eri menetelmien keskihajonnat kasvoivat. 2 m/s nopeudella ”vector-pursuit”-menetelmän navigointivirheen keskihajonta oli n. 0.4 m. Muilla menetelmillä stabiililla toiminta-alueella jopa hieman tämän alle. Suuntavirheen keskihajonta ei kasvanut U:n muotoiseen polkuun verrattuna. Suuremmilla nopeuksilla navigointivirheen keskihajonta nousi lähelle 1 m.



Kolmantena testitapana Wit käytti askelmaista muutosta polussa. Hän teki testiajoja 2-6 m kokoisilla askeleilla polun muuten ollessa suora ja mittasi ylityksen eri nopeuksilla. ”Vector-pursuit”-menetelmällä oli pienin ylitys jokaisella nopeudella ja jokaisella askeleen suuruudella. Kolmen metrin askeleella ylitys oli noin 0.5 m kaikilla kolmella testatulla nopeudella.

Tässä diplomityössä saadut testaustulokset eivät ole suoraan verrannollisia edellisiin tutkimustuloksiin, sillä testilaitteistot ja testausympäristöt poikkeavat toisistaan.

### 2.2.2 Malliprediktiivinen säädin

Malliprediktiivisestä säätimestä (MPC, engl. Model Predictive Control) löytyy runsaasti kirjallisuutta. Tässä työssä on käytetty pääasiallisena lähteenä ”Model Predictive Control Toolbox User Guide”- teosta [6]. Vähemmän matemaattisemmin malliprediktiivistä säätöä on käsitelty Jani Posion raportissa ”Malliprediktiivinen säätö” [20]. Hyvän johdannon epälineaariseen malliprediktiiviseen säätöön ovat tehneet Rold Findeisen ja Frank Allgöwer teoksessaan ”An Introduction to Nonlinear Model Predictive Control” [9].

#### 2.2.2.1 Teoriaa

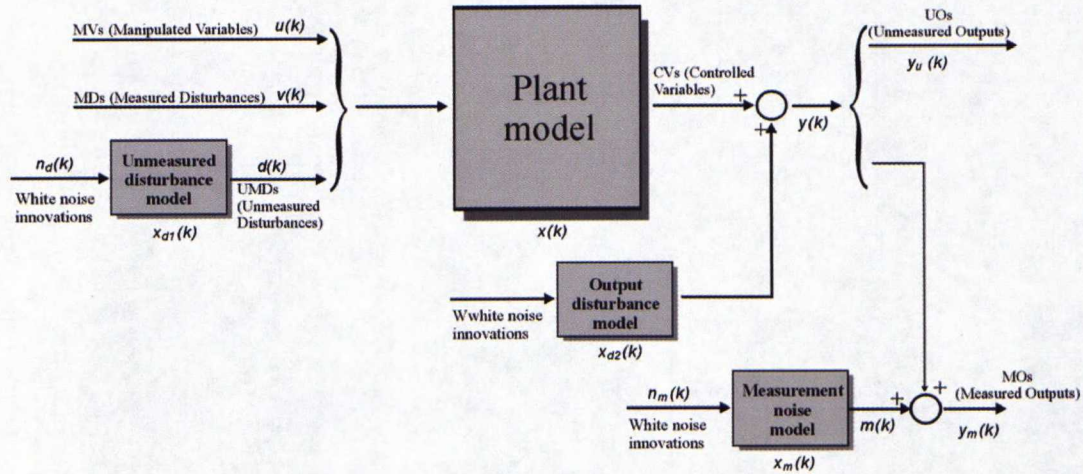
Malliprediktiivisen säätimen lähtökohtana on säädettävästä prosessista mallinnettu matemaattinen malli. Työssä käytetty Matlabin Model Predictive Control Toolbox [23] käyttää prosessin mallina (engl. plant model) lineaarista aikainvarianttia mallia, jonka yleinen muoto on kirjoitettu kaavassa 9. [6]

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}_u u(k) + \mathbf{B}_v v(k) + \mathbf{B}_d d(k) \\ y_m(k) &= \mathbf{C}_m x(k) + \mathbf{D}_{vm} v(k) + \mathbf{D}_{dm} d(k) \\ y_u(k) &= \mathbf{C}_u x(k) + \mathbf{D}_{vu} v(k) + \mathbf{D}_{du} d(k) + \mathbf{D}_{uu} u(k) \end{aligned} \tag{9}$$

, jossa  $x$  on prosessin tilavektori,  $u$  ohjaussuurevektori,  $v$  mitattujen häiriöiden vektori,  $d$  mittaamattomien häiriöiden vektori,  $y_m$  mitattujen ulostulojen vektori ja  $y_u$  mittaa-



mattomien ulostulojen vektori. Vektori  $y$  kokoaa vektorit  $y_m$  ja  $y_u$  yhdeksi ulostulovektoriksi. Kuvassa 5 on selvennys vektoreiden toistensa välisistä suhteista.



Kuva 5. Malliprediktivisen säätimen malli tilan estimointiin [6]

Prosessin mittaamattomat häiriöt ( $d$ ) mallinnetaan samanlaisen lineaarisen aikainvariantin mallin avulla kuin koko systeemi. Tämän mallin syötteinä toimii normaalijakautunut valkoinen kohinavektori ( $n_d$ ), joka on nollakeskiarvoista ja korreloimatonta. Mittaamattomien häiriöiden malli on kirjoitettu kaavaan 10. [6]

$$\begin{aligned} x_d(k+1) &= \bar{\mathbf{A}}x_d(k) + \bar{\mathbf{B}}n_d(k) \\ d(k) &= \bar{\mathbf{C}}x_d(k) + \bar{\mathbf{D}}n_d(k) \end{aligned} \quad (10)$$

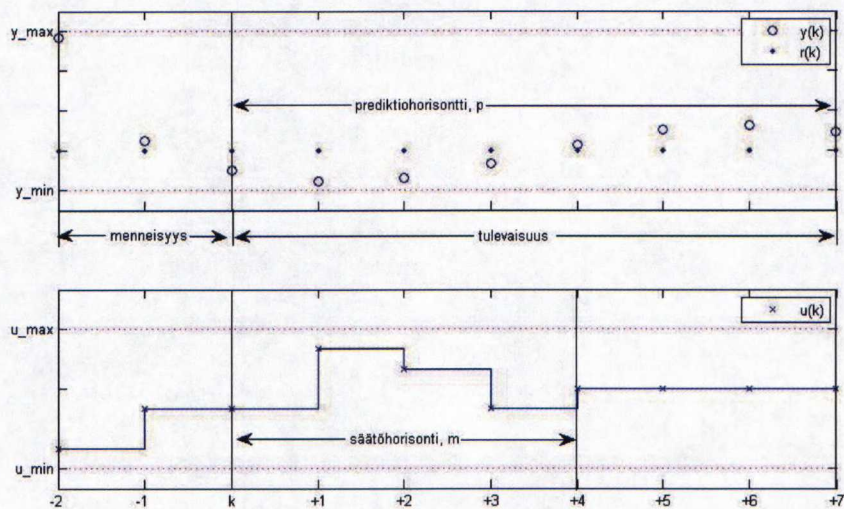
Prosessin ulostulossa olevaa mittaushäiriötä ( $m$ ) mallinnetaan samalla tavalla kuin prosessin mittaamattomia häiriöitä. Malli on lineaarinen aikainvariantti systeemi, jonka syötteenä toimii normaalijakautunut valkoinen kohinavektori  $n_m$ , joka on nollakeskiarvoista ja korreloimatonta. Malli on kaavassa 11. [6]

$$\begin{aligned} x_m(k+1) &= \tilde{\mathbf{A}}x_m(k) + \tilde{\mathbf{B}}n_m(k) \\ m(k) &= \tilde{\mathbf{C}}x_m(k) + \tilde{\mathbf{D}}n_m(k) \end{aligned} \quad (11)$$



Jos säädettävä prosessi on epälineaarinen, on se linearisoitava, jotta se saataisiin edellä kuvattujen mallien mukaisiksi. On olemassa myös epälineaarisia malliprediktiviisiä säätimiä (NMPC, engl. Nonlinear Model Predictive Control) suoraan epälineaarisille malleille [9]. Tässä työssä päädyttiin käyttämään linearisointia ja lineaarista MPC menetelmää aikataulullisista ja toteutusteknisistä syistä.

Malliprediktiviisen säätimen ideana on ennustaa prosessin tulevaa tilaa  $p$ -askelta eteenpäin edellä kuvatun prosessin matemaattisen mallin avulla ja laskea optimaaliset ohjaussuureet  $m$ -askeleelle eteenpäin. Kuvassa 6 on esitetty systeemin ulostulon  $y$ , ohjaussuureen  $u$  ja referenssitrajektorin  $r$  kuvaajat. Lisäksi kuvaan on merkitty ulostulojen ja ohjauksen maksimiarvot. Vaikka säädin laskee optimaaliset ohjaussuureet  $m$ -askeleelle, niistä käytetään vain ensimmäinen ja seuraavalla ajanhetkellä lasketaan uudet ohjaussuureet.



Kuva 6. Malliprediktiviisen säätimen säätö- ja prediktiohorisontit

Malliprediktiviinen säädin laskee ohjaussuureen arvon hetkellä  $k$  minimoimalla kustannusfunktion (engl. cost function)  $J(\Delta u, \varepsilon)$  arvon. Kustannusfunktion yleinen muoto on kaavassa 12. [6]



$$\begin{aligned}
J(\Delta u, \varepsilon) = & \sum_{i=0}^{p-1} \left( [y(k+i+1|k) - r(k+i+1)]^T \mathbf{Q} [y(k+i+1|k) - r(k+i+1)] \right. \\
& + \Delta u(k+i|k)^T \mathbf{R}_{\Delta u} \Delta u(k+i|k) \\
& \left. + [u(k+1|k) - u_{target}(k+1)]^T \mathbf{R}_u [u(k+1|k) - u_{target}(k+1)] \right) + \rho_\varepsilon \varepsilon^2
\end{aligned} \tag{12}$$

, jossa  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}_{\Delta u}$  ja  $\mathbf{R}_u$  ovat neliöllisiä positiivi semi-definiittejä matriiseita, jotka sisältävät eri komponenttien kustannusten painokertoimet.  $\mathbf{Q}$  matriisi painottaa mallin ulostulon virhettä trajektoriiin nähden,  $\mathbf{R}_{\Delta u}$  painottaa ohjaussuureen muutosta ja  $\mathbf{R}_u$  painottaa ohjaussuureen eroa halutusta ohjaussuureen arvosta. Yleensä  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}_{\Delta u}$  ja  $\mathbf{R}_u$  ovat kuitenkin diagonaalimatriiseja. Laskennassa on myös seuraavat ohjauksen, ohjauksen muutosnopeuden ja mallin ulostulojen rajoitukset (engl. constraints) voimassa:

$$\begin{cases} u_{\min}(i) - \varepsilon V_{\min}^u(i) \leq u(k+1|k) \leq u_{\max}(i) + \varepsilon V_{\max}^u(i) \\ \Delta u_{\min}(i) - \varepsilon V_{\min}^{\Delta u}(i) \leq \Delta u(k+1|k) \leq \Delta u_{\max}(i) + \varepsilon V_{\max}^{\Delta u}(i) \\ y_{\min}(i) - \varepsilon V_{\min}^y(i) \leq y(k+i+1|k) \leq y_{\max}(i) + \varepsilon V_{\max}^y(i) \\ \varepsilon \geq 0 \end{cases} \tag{13}$$

, jossa  $\varepsilon$  on löysennys muuttuja rajoja pehmentämässä. Vektoreilla  $V_{\min}^u$ ,  $V_{\max}^u$ ,  $V_{\min}^{\Delta u}$ ,  $V_{\max}^{\Delta u}$ ,  $V_{\min}^y$  ja  $V_{\max}^y$  voidaan rajojen pehennysten suuruutta säätää. Mitä suurempi alkiion arvo on, sitä löyhempi kyseinen raja on. [6]

Eri suuret prediktiohorisontin ( $p$ ) ja säätöhorisontin ( $m$ ) arvot otetaan huomioon asettamalla ohjaussuureen muutoksen arvot nolaksi prediktiohorisontin ulkopuolella kaavan 14 mukaisesti. [6]

$$\Delta u(k+h|k) = 0, h = m, \dots, p-1 \tag{14}$$

Kustannusfunktio  $J(\Delta u, \varepsilon)$  voidaan minimoida analyttisesti, jos muuttujilla ei ole rajoituksia (kaava 13). Rajoitusten ollessa voimassa Model Predictive Control Toolbox ratkaisee optimaaliset ohjaussuureet käyttäen QP-ratkaisinta (Quadratic Programming, engl. QP-solver,). [6]



Edellä mainitun kustannusfunktion  $J(\Delta u, \varepsilon)$  minimointi kuitenkin edellyttää, että kaavoissa 9 ja 10 esitettyjen tilamallien tilat  $x$  ja  $x_d$  ovat tunnettuja, jotta systeemin ulostulot voitaisiin ennustaa mallien avulla. Koska kyseiset tilat eivät ole suoraan mitattavia, on käytettävä tilaestimaattoria.

Tilaestimaattori (engl. state estimator) estimoi mallien tilojen ( $x$ ,  $x_d$  ja  $x_m$ ) estimaatit ( $\hat{x}$ ,  $\hat{x}_d$  ja  $\hat{x}_m$ ) lineaarisesti havaituista ulostuloista  $y_m$ . Tilaestimaattorin kaavat ovat seuraavat: [6]

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k|k-1) \\ \hat{x}_d(k|k-1) \\ \hat{x}_m(k|k-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\hat{x}(k-1|k-1) + \mathbf{B}_u u(k-1) + \mathbf{B}_v v(k-1) + \mathbf{B}_d \bar{\mathbf{C}}\hat{x}_d(k-1|k-1) \\ \bar{\mathbf{A}}\hat{x}_d(k-1|k-1) \\ \tilde{\mathbf{A}}\hat{x}_m(k-1|k-1) \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_m(k) = \mathbf{C}_m \hat{x}(k|k-1) + \mathbf{D}_{vm} v(k) + \mathbf{D}_{dm} \bar{\mathbf{C}}\hat{x}_d(k|k-1) + \tilde{\mathbf{C}}\hat{x}_m(k|k-1) \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k|k) \\ \hat{x}_d(k|k) \\ \hat{x}_m(k|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(k|k-1) \\ \hat{x}_d(k|k-1) \\ \hat{x}_m(k|k-1) \end{bmatrix} + \mathbf{M}(y_m(k) - \hat{y}_m(k))$$

, jossa vahvistus  $\mathbf{M}$  on laskettu Kalman-suotimen kaavoilla laajennetusta mallista, joka on kaavassa 16. [6]

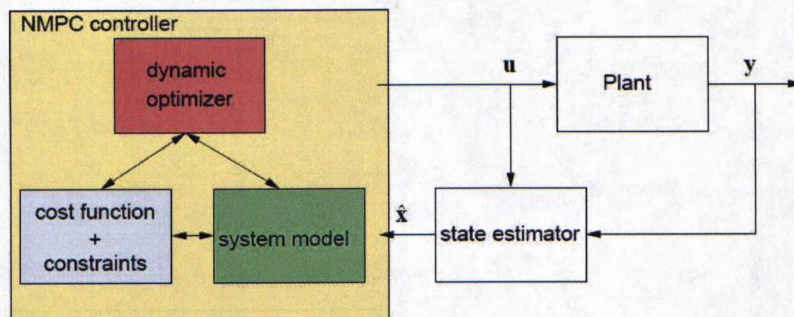
$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x_d(k+1) \\ x_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_d \bar{\mathbf{C}} & 0 \\ 0 & \bar{\mathbf{A}} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\mathbf{A}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \\ x_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(k)$$

$$+ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \bar{\mathbf{D}} & 0 & \mathbf{B}_u & \mathbf{B}_v \\ \bar{\mathbf{B}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\mathbf{B}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_d(k) \\ n_m(k) \\ n_u(k) \\ n_v(k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$y_m(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_m & \mathbf{D}_{dm} \bar{\mathbf{C}} & \tilde{\mathbf{C}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \\ x_m(k) \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{vm} v(k) + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{D}}_m & \tilde{\mathbf{D}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_d(k) \\ n_m(k) \\ n_u(k) \\ n_v(k) \end{bmatrix}$$



Malliprediktiivisen säätimen säätöluoppi on esitetty vielä kuvassa 7. Kuva havainnollistaa aikaisemmin kuvattujen malliprediktiivisen säätimen osien suhdetta toisiinsa sekä säädettävään järjestelmään.



Kuva 7. Epälineaarisen ja lineaarisen malliprediktiivisen säätimen säätöluoppi [9]

Kun malliprediktiivistä säädintä sovelletaan polun seurantaan, on ohjattavasta työko-  
neesta tehtävä kinemaattinen malli. Tätä kinemaattista mallia käytetään tulevien mit-  
tausten ennustamiseen. Haluttu trajektori on seurattava polku. Myös muita mittaussuu-  
reita voi olla ja muuttujien rajoituksia voidaan käyttää esimerkiksi esteiden kiertämi-  
seen, kuten Vougioukas on tehnyt tutkimuksessaan [28].

#### 2.2.2.2 Menetelmän suorituskyky

Vougioukas on omassa tutkimuksessaan [28] tutkinut simuloimalla ”pure-pursuit”-  
tyyppisen tähtäyspistemenetelmän ja tutkimuksessa kehitetyn malliprediktiivisen mene-  
telmän suorituskykyjen eroa. Simuloinnissa käytettiin ajoneuvona akseliväliltään 2 m  
pitkää ajoneuvoa, jonka pyörien maksimikäntökulma oli 60 astetta sekä maksimino-  
peus 1 m/s. Testipolkuja olivat neliön muotoinen polku, joka sisälsi kaksi jyrkkää 90  
asteen käännöstä sekä käännökset ilman peruutusta ja peruuttamisen kanssa.

Vougioukas käytti testeissään tähtäyspistemenetelmän tähtäyspisteen etäisyytenä 1.25 m  
etäisyyttä. Algoritmin vahvistukset oli säädetty arvoihin, joilla pienin ylitys saavutettiin.  
Neliönmuotoisella radalla ”pure-pursuit”-menetelmän keskimääräiseksi seurantavir-  
heeksi tuli 4.62 cm ja suurimmaksi seurantavirheen arvoksi 34.94 cm.



Malliprediktiivisen säätimen säätöhorisontin pituutta vaihdeltiin testeissä 20:sta 60:een. Simulointien mukaan malliprediktiivisen säätimen tulokset olivat huonompia kuin tähtäyspistemenetelmän, kun säätöhorisontin pituus oli vähemmän kuin 25. Säätöhorisontin ollessa 60, keskimääräinen seurantavirhe oli 4.2 cm ja suurin seurantavirhe 19.78 cm. Malliprediktiivinen säädin ylsi parempiin tuloksiin, sillä säädin käänsi ajoneuvoa mutkasta pois päin ennen jyrkkää 90 asteen kulmaa. Tämä lisäsi hetkellisesti seurantavirhettä, mutta johti kokonaisuudessa pienempään virheeseen. Vougioukaksen mukaan vastaavanlaista toimintaa ei saada aikaan PID-säätimen tyyppisillä algoritmeilla.

Myös Lenain et al. [17] on tutkinut malliprediktiivisen säätimen suorituskykyä. Tällä kertaa testit on tehty todellisella laitteistolla ja ajoneuvona on toiminut Claas Ares 640 traktori. Paikkatieto on saatu 10 Hz RTK GPS laitteistolla, jonka tarkkuus oli +/- 2 cm. Tutkimuksessa on johdettu malli traktorin dynamiikalle, kun otetaan luistamiset huomioon. Malliprediktiivistä säädintä on käytetty ennustamaan tulevat ohjausliikkeet, jotka on laskettu seurattavasta polusta suoraan. Tällä on pyritty poistamaan ohjausjärjestelmän dynamiikasta johtuvat seurantavirheet. Tämän lisäksi on käytetty erillistä ohjauslakia, joka ottaa huomioon luistamiset ja hetkellisen virheen halutusta polusta. Malliprediktiivinen säädin ei siis suoraan anna traktorin ohjausta.

Lenain et al. ovat tutkimuksessaan saaneet kohtuullisen hyviä ohjaustarkkuuksia. Säteeltään alle 10 m kaaroksessa 8 km/h nopeudella ajettaessa ja tutkimuksessa kehitettyä säädintä käyttämällä vaakasuuntaisen virheen suurin poikkeama oli 0.15 m. Kun testiajoissa käytettiin ohjauslakia ilman ohjauksen ennustusta sekä luistamisen estimointia, poikkeaman suuruus nousi 0.5 m luokkaan. Malliprediktiolla saatiin siis parannettu perinteisen säätölain suorituskykyä.

Lähtökohtaisesti tässä työssä on käytetty malliprediktiivistä säädintä samaan tapaisesti kuin Vougioukas on työssään käyttänyt. Lenain et al. käyttää malliprediktiivisen säätimen lisäksi klassista säätölakia.



### **3 Tutkimusaineisto ja – menetelmät**

Tämän diplomityön tutkimuksen aiheena oli kokeilla ja kehittää traktorin ja työkoneen yhdistettyä navigointijärjestelmää. Seuraavissa aliluvuissa on kuvattu kokeissa käytettyä fyysistä järjestelmää, navigointijärjestelmän kehittämisessä käytettyjä ohjelmistoja sekä kehitettyjä ja kokeiltuja algoritmeja.

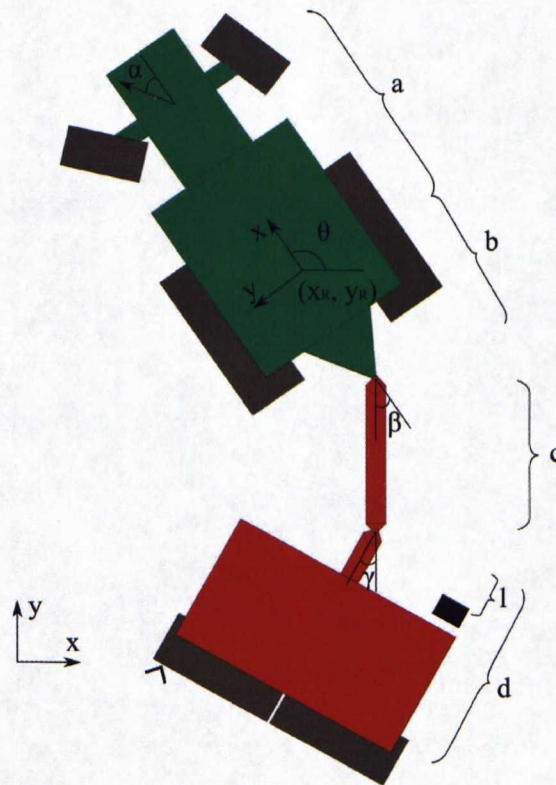
#### **3.1 Järjestelmä**

Fyysinen järjestelmä koostuu navigoitavasta traktorin ja työkoneen yhdistelmästä, paikannuksessa käytetyistä mittalaitteista sekä ohjausjärjestelmän elektroniikasta. Seuraavissa aliluvuissa on kuvattu, miten fyysinen laitteisto parametroidiin ja kuvattiin ohjelmiston sisällä, mistä laitteistosta testiympäristö koostui ja miten kaikki laitteet liittyivät toisiinsa.

##### **3.1.1 Koordinaatistot, tilat ja parametrit**

Tässä työssä käytettiin globaalina peruskoordinaatistona Suomessa yleisesti käytettyä YKJ -projektiota, jossa x-akselin positiivinen suunta on itään ja y-akselin positiivinen suunta on pohjoiseen. Oikean käden säännön mukaisesti globaalinen koordinaatiston z-akselin positiivinen suunta on ylöspäin. Traktorin koordinaatiston origoksi valittiin taka-akselin keskipiste maan tasossa kuvan 8 mukaisesti. Traktorin koordinaatiston x-akseli osoitti traktorin keulaa kohden ja z-akseli ylöspäin. Vastaavasti kuin globaalissa koordinaatistossa, y-akseli osoitti traktorista katsottuna vasemmalle oikean käden säännön mukaisesti.





Kuva 8. Traktori-työkone yhdistelmän fyysiset mitat sekä matemaattisen mallin tilat

Traktori-työkone yhdistelmän kinemaattisen mallin tiloina käytettiin traktorin taka-akselin paikkaa  $(x_R, y_R)$ , traktorin kulkusuuntaa  $(\theta)$ , traktorin ja työkoneen vapaan nivelen kulmaa  $(\beta)$  ja työkoneen ohjattavan nivelen kulmaa  $(\gamma)$ . Malliprediktioisessa säätimessä tilana oli lisäksi myös laserskannerin mittaama kohtisuora poikkeama  $(L)$  halutusta trajektorista. Ohjattavina suureina olivat etuakselin pyörien kulma  $(\alpha)$ , työkoneen ohjattavan nivelen kulman muutos  $(\dot{\gamma})$  sekä traktorin nopeus  $(v)$ .

Fyysiset parametrit olivat traktorin akseliväli  $(a)$ , työkoneen kiinnityspisteen etäisyys traktorin taka-akselista  $(b)$ , työkoneen nivelten välisen aisan pituus  $(c)$ , työkoneen pituus takimmaisesta akselin jälkeen  $(d)$  sekä laser-skannerin etäisyys takimmaisesta nivelestä  $(l)$ . Fyysiset mitat on havainnollistettu kuvassa 8 yhdessä mallin tilojen kanssa.



### 3.1.2 Traktorin ja työkoneen yhdistelmä

Työssä koelaitteistona käytetty traktorin ja työkoneen yhdistelmä on kuvassa 9.

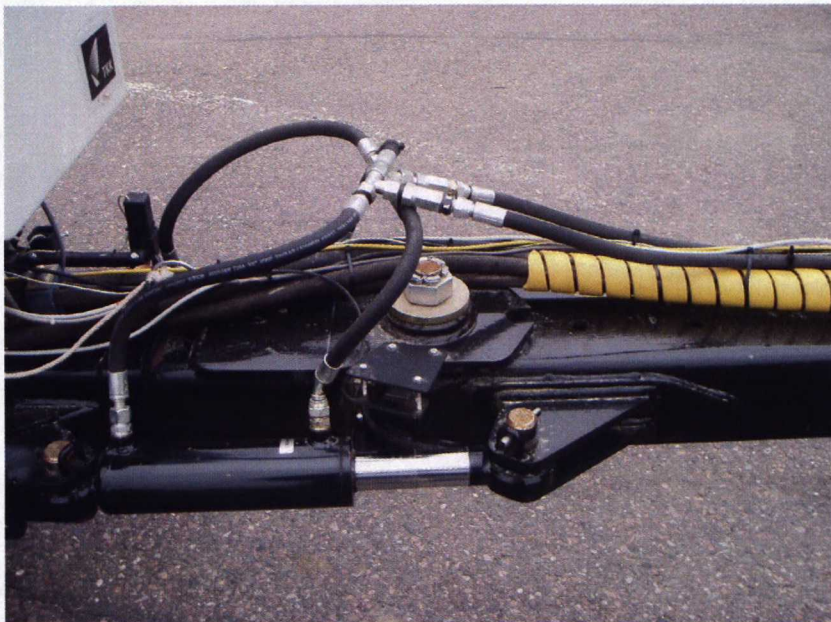


Kuva 9. Työssä käytetty traktorin ja työkoneen yhdistelmä

Traktorina oli Valtran valmistama ISOBUS class 3 [10] yhteensopivan traktorin prototyyppi, jossa peruskoneena Valtra T190. Traktorissa ei vielä ollut etupyörien kulman ohjausmahdollisuutta ISOBUS väylän avulla, joten tähän tarkoitukseen käytettiin traktoriin asennettua Agco:n Auto-Guide järjestelmän pyörienohjausmoduulia.

Työkoneena oli Junkkarin valmistama kylvölannoitin Maestro 3000, johon on Farmix projektissa kehitetty ja lisätty ISOBUS ohjaus. Tämän työn yhteydessä kylvölannoittimeen on vielä kehitetty ohjattava nivelaisa yhdessä koneen valmistajan kanssa. Aisan ohjattava nivel on kuvassa 10. Aisaa ohjattiin nivelen molemmin puolin asennettujen hydraulisyinterien avulla, joten toiminta oli symmetristä molempiin suuntiin. Aisan servosäätöä varten niveleen on asennettu sen kulmaa mittaava anturi.





Kuva 10. Aisan ohjattava nivel sekä sen kulmaa mittaava anturi

Järjestelmästä mitatut edellisessä luvussa kuvatut fyysiset parametrit on listattu tauluk-  
koon 5.

Taulukko 5. Koelaitteiston fyysiset parametrit

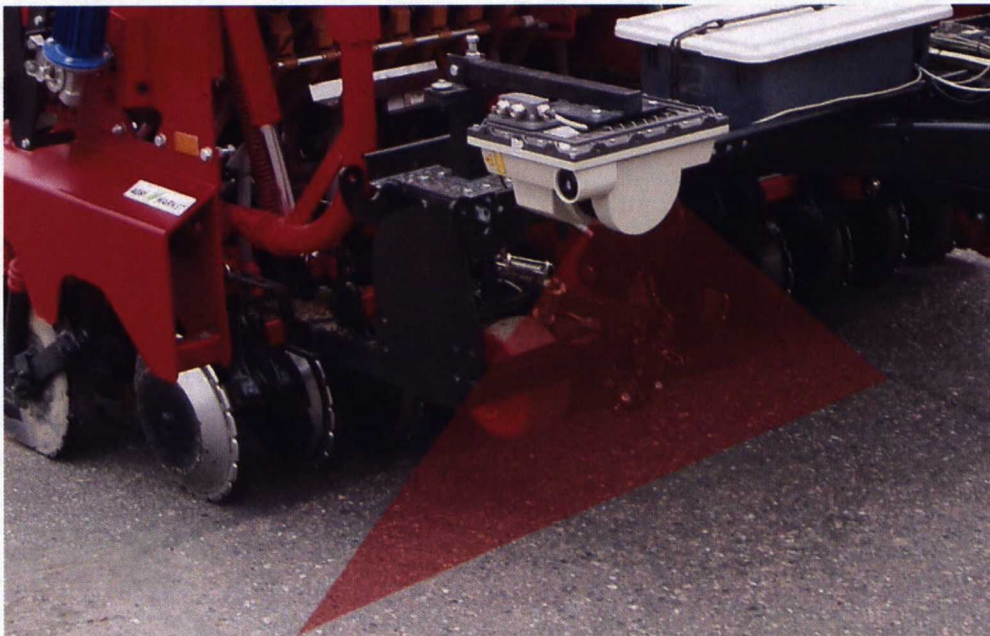
Kuvaus	Symboli	Arvo
Akseliväli	$(a)$	2.8 m
Traktorin leveys		2.43 m
Vetoakselin kiinnityspisteen etäisyys traktorin taka-akselista	$(b)$	1.70 m
Aisan pituus vapaan ja ohjattavan nivelen välissä	$(c)$	2.30 m
Kylvökoneen pituus aisan ohjattavan nivelen jälkeen	$(d)$	3.30 m
Kylvökoneen leveys		2.95 m
Laserin etäisyys aisan ohjattavasta nivelestä	$(l)$	0.80 m



### 3.1.3 Paikantamisessa käytetyt mittalaitteet

Traktorin ja työkonteen paikantamiseen käytetyt mittalaitteet olivat RTK-GPS ja 2D laserskanneri. Koska työssä käytetty navigointipiste sijaitsi maatasossa, korjattiin RTK-GPS signaalista traktorin kallistuksesta johtuvat virheet pois Navix-järjestelmän avulla. Lisäksi kylvökoneen paikkaa on testeissä mitattu validointimielessä VRS-GPS:n avulla.

Laserskannerina tutkimuksessa toimi SICK LMS221 2D tasolaserskanneri [22]. Laserskanneri mittaa kohteiden etäisyyttä laserskannerin edessä tasomaisesti asteen välimatkoin 180 asteen alueelta. Mittaukset saadaan n. 77 Hz taajuudella RS-422 väylän kautta. Laserskanneri oli tutkimuksessa kiinnitetty kylvökoneen oikeaan etureunaan keilaamaan kohtisuoraan maata vasten. Asennuskorkeus oli noin metrin maan pinnasta, joten vaakasuuntainen resoluutio suoraan skannerin alapuolella oli 1.7 cm ja mitattavan alueen reunalla n. 8 cm. Kuva laserskannerin asennuksesta ja osa kuvitellusta keilaussäteestä on kuvassa 11.



Kuva 11. 2D laserskannerin asennus. Kuvaan on piirretty laserskannerin kuviteltu keilaus.



Tutkimuksessa käytetty RTK-GPS laitteisto oli Trimblen valmistama. RTK-GPS laitteisto koostui Trimble 4400 tukiasemasta sekä traktorissa olleista Trimble 7400MSi vastaanottimesta ja GPS-antennista. Vastaanotin yhdistettiin autopilot-järjestelmän alustana toimineeseen kannettavaan tietokoneeseen RS-232 portin kautta. Paikkatieto saatiin NMEA-0183 standardin mukaisella GGA viestillä ja suuntatieto VTG viestillä. Vastaanotin lähetti uuden paikka ja suuntatiedon 200 ms välein.

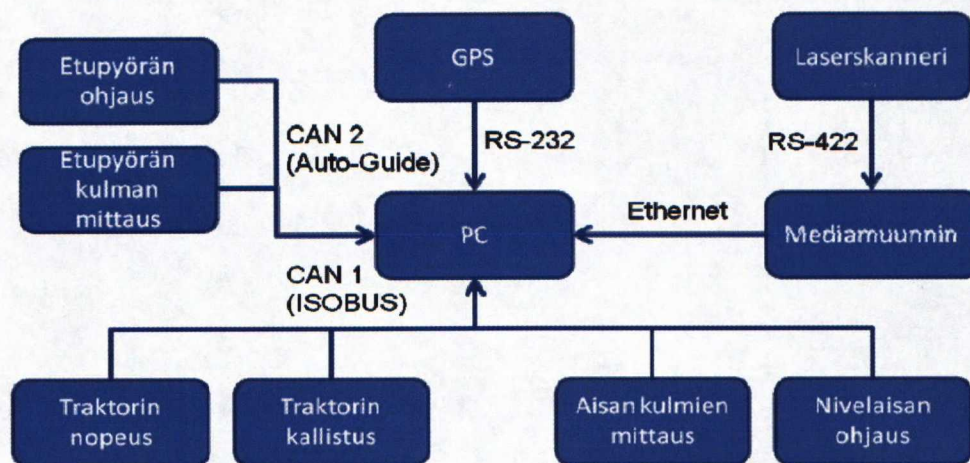
Koska RTK-GPS:n vastaanottoantenni sijaitsi traktorin katolla ja navigointipisteenä käytettiin traktorin taka-akselin keskikohtaa maapinnan tasossa, oli RTK-GPS:n ilmoittama paikkaa siirrettävä. Siirtoa varten tarvittiin tieto traktorin kallistumisesta ja suuntauksesta, jotta kallistuksesta aiheutuva vaakasuuntainen mittavirhe saatiin kompensoitua. Kulmatietojen mittaamiseen käytettiin alun perin Agrix-projektissa kehitettyä Navix-järjestelmää [18] päivitettyinä. Navix-järjestelmästä saataisiin myös paikkatieto, mutta tässä työssä käytettiin suoraan RTK-GPS:n mittaamaa paikkaa. Testiajoissa Navix-järjestelmän tietokoneessa oli ongelmia, joten kallistuskorjausta ei voitu käyttää ollenkaan.

Työkoneen paikan referenssimittaus saatiin VRS-GPS:n avulla. VRS-GPS laitteisto koostui Trimble 5700 vastaanottimesta [26], Trimble Zephyr antennista, Trimble TSCe käyttöliittymästä sekä korjaussignaalin vastaanottavasta matkapuhelimesta. VRS-GPS:n antenni oli kiinnitetty kylvölannoittimen päälle vantaiston kohdalle, joten mitattua paikkaa ei tarvinnut siirtää analysointia varten. Myös tässä vastaanottimessa oli RS-232 liityntä sekä tiedot sai NMEA-0183 standardin mukaisilla viesteillä. Laite kykenee 20 Hz toimintaan, mutta kokeissa käytettiin vain 100 ms lähetysväliä.



### 3.1.4 Navigointi-järjestelmän sähköiset liitännät

Kuvassa 12 on piirretty koko navigointi-järjestelmän sähköiset liitännät kaaviomuodossa. Järjestelmän keskuksena toimi Dell Latitude D630 kannettava tietokone, jossa oli Intel Core2 Duo T7500 @2.20GHz prosessori ja 2 GB muistia. Ulkoisia liitännöjä oli lisätty Kvaser LAPcan II CAN-väyläkortin avulla.



Kuva 12. Järjestelmän sähköiset liitännät

Järjestelmän laitteiden liittämiseen käytettiin kahta CAN-väylää, RS-232 porttia sekä RS-422 väylää Ethernet-liitännän kautta.

Traktorin pyörien ohjauksessa käytetty Auto-Guiden pyörienohjausmoduuli liitettiin tietokoneeseen Auto-Guiden oman CAN-väylän avulla. Muut CAN-väylän kautta mitattavat tai ohjattavat laitteet olivat liitetty traktorin ISOBUS-väylään. Mittauksia saatiin traktorin ECU:sta, Navix-järjestelmästä ja MCC2212 CAN-ohjaimesta. Traktorin ECU lähettää tietoja mm. ajonopeudesta sekä pyöristä että maatutkan avulla mitattuna. Tässä työssä käytettiin hyväksi pyöristä mitattua nopeutta. Navix-järjestelmä lähettää kallistus- ja suuntakulmat CAN-viestien avulla. Aisan nivelten mittaukseen käytetyt potentiometrit oli liitetty MCC2212 CAN-ohjaimeen, joka lähetti ne edelleen 100 ms välein CAN-



väylälle. Aisan ohjaamiseen käytettiin traktorin hydraulikkaventtiileitä ja niiden ohjaamiseen traktorin ISOBUS ominaisuuksia.

GPS-vastaanottimet oli kytketty tietokoneen sarjaportteihin. Koska tietokoneessa oli vain yksi RS-232 portti, käytettiin VRS-GPS:n liittämiseen USB-RS232 muunninta. RTK-GPS liitettiin suoraan tietokoneeseen viiveiden minimoimiseksi.

Laserskannerin ainut liitântätapa oli RS-422 väylä. Koska tietokoneessa ei ollut RS-422 porttia, käytettiin mediamuunninta muuntamaan sarjaliikenne Ethernet-verkkoon UDP-paketeiksi. Tähän tarkoitukseen käytettiin Moxan valmistamaa NPort W2250 Plus langatonta laitepalvelinta [19]. Laite kytkettiin tietokoneeseen kuitenkin verkko-kaapelin avulla, sillä WLAN-verkon käytöstä aiheutui ylimääräisiä viiveitä mittauksiin.



## 3.2 Ohjelmisto

Navigointijärjestelmän ohjelmisto toimi Windows XP käyttöjärjestelmän päällä. Koska pääasiallisena tarkoituksena oli tutkia navigointialgoritmeja, päätettiin nopean käyttöönoton vuoksi käyttää Matlab Simulink-ympäristöä. Näin saatiin sekä sovelluskehitys, simulointi että ajonaikainen navigointiohjelma tehtyä samassa ympäristössä. Saman sovellusympäristön vuoksi myös järjestelmän iteratiivinen kehitys oli helppoa.

### 3.2.1 Matlab Simulink

Simulink on simulointiympäristö ja graafinen mallipohjainen suunnitteluympäristö. Jo perusasennuksessa on mukana laaja kirjo erityyppisiä lohkoja simulointimallien luomiseen ja kirjastojen avulla tarjontaa voidaan entisestään laajentaa. Simulink on rakennettu Matlab-ohjelmiston päälle ja peruskäytössä myös Matlabin ominaisuuksia voidaan käyttää Simulinkistä. [25]

Simulink-mallien kuvaus perustuu lohkojen käyttöön. Lohkojen välille piirretään viivoja, jotka esittävät muuttujien liikkumista lohkojen välillä. Muuttujien tietotyyppi voi olla mikä tahansa, mikä normaaleissa ohjelmointikielissä on käytössä. Lisäksi muuttuja voi olla vektori, eli muuttuja voi koostua useammasta yksittäisestä saman tietotyypin muuttujasta. Lohkojen sisällä muuttujille tehdään toimenpiteitä, jotka riippuvat lohkon tyypistä. Peruslohkoja ovat esimerkiksi erilaiset matemaattiset operaattorit, loogiset operaattorit, lookup-taulukot, signaalin lähteet, viiveet ja tulostus-lohkot. Monimutkaisemmat lohkot ovat joko peruslohkoista koostettuja kokonaisuuksia, Matlabin tulkattavalla kielellä tehtyjä komentojonoja tai jollain ohjelmointikielellä tehtyjä ja Simulinkin käyttöön käännettyjä palikoita. Jokaiselle lohkolle määritellään päivitysajanjakso. Simuloitaessa Simulink päättelee lohkojen suoritusjärjestyksen tietovirran mukaan ja suorittaa eri lohkojen toimintoja syklisesti määritellyllä taajuudella. Simulointiaika ei normaalisti simuloitaessa vastaa reaaliaikaa.

Simulink ei ole sellaisenaan tarkoitettu reaaliaikaiseen käyttöön, joten projektin edetessä tämä aiheutti ongelmia sekä toimilaitteiden ohjauksessa että itse algoritmien toimin-

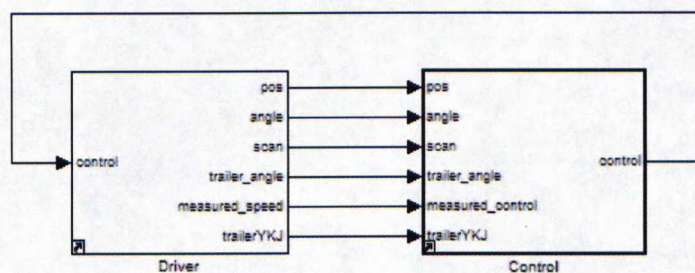


nassa. Real-Time Workshop kirjaston [24] avulla voitaisiin mallista luoda itsenäisesti ajettavaa C-koodia, mutta tämä vaatii että kaikki mallissa käytetyt lohkot tukevat tätä ominaisuutta. Malliprediktiiiviseen säätimeen käytettiin Matlabin Model Predictive Control Toolbox työkalua [23] Matlab-funktioiden (.m) avulla. Työssä käytetty Matlab versio (R2007b) ei vielä tukenut Matlab-funktioiden käyttöä Real-Time Workshopin yhteydessä, joten malli oli ajettavissa pelkästään Simulinkin sisällä.

### 3.2.2 Simulaattori

Järjestelmän suunnittelu ja testaus lähti liikkeelle simulaattorista. Simulaattori on helppo ja nopea tapa kehittää algoritmeja ilman, että tarvitsee jokaista muutosta erikseen testata todellisella laitteistolla. Lisäksi simulointiympäristössä ajan ei tarvitse kulkea reaaliajassa, joten säädinten toimintaa on helpompi tarkkailla erilaisten tulostusten avulla. Myös malliprediktiiivistä säädintä varten oli laitteistosta luotava malli, joten simulaattorin tekeminen ei oleellisesti lisännyt tutkimuksen työmäärää.

Ohjelman rakenne on suunniteltu siten, että samaa säädin-lohkoa voidaan käyttää sekä simulaattorissa että todellisen laitteiston ohjauksessa. Kuvassa 13 on kuva ohjelman päätason rakenteesta todellisen laitteiston ohjauksen tapauksessa. Simulaattorissa vassemmanpuoleinen ajuri-lohko on korvattu simulaatio-lohkolla. Lohkot on tallennettu omaan kirjastoon, johon sekä varsinainen ohjelma että simulaattori viittaavat. Näin säätimeen tehdyt muutokset tulevat molempiin malleihin automaattisesti.

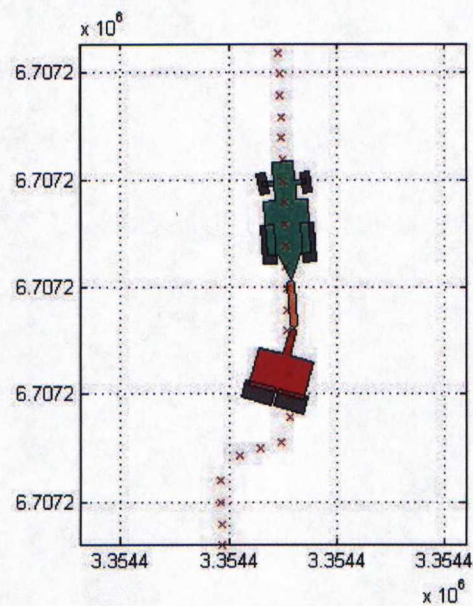


Kuva 13. Ohjelman päätason rakenne



Järjestelmän kinematiikan kaavat on esitetty myöhemmin malliprediktiivisen säätimen yhteydessä luvussa 3.3.3.3 *Malliprediktiivinen säädin*. Simulaattoriin on järjestelmän kinematiikan lisäksi mallinnettu toimilaitteiden dynamiikkaa ja mittausten häiriöitä. Dynamiikat on pyritty mallintamaan todellisen laitteiston ohjausvasteista. Mittauksiin on lisätty valkoista kohinaa, jonka varianssin suuruus on pyritty saamaan samaksi, kuin todellisissa mittauksissa. GPS-signaaliin on lisätty Navix-järjestelmän kehittämisen yhteydessä identifioitu halvan GPS-vastaanottimen häiriömalli vaimennettuna. Lisäksi sekä mittauksissa että ohjauksissa on todellista vastaavat viiveet.

Simulaattorilla tehdyistä ajoista tallentuu samat muuttujatiedot kuin todellisella laitteistolla tehdyistä ajoista, joten näitä voidaan analysoida samoilla tulostuskomennoin. Lisäksi molemmissa voitaisiin ajon aikaisesti visualisoida laitteiston liikettä, mutta piirron hitauden vuoksi sitä ei käytetty kuin simulaattorin kanssa. Kuvassa 14 on esitetty miten simulaattori visualisoi navigoitavan järjestelmän liikettä.



Kuva 14. Simulaattorin visualisoima laitteiston liike



3.2.3 Laiteajurit

Koska myös todellista laitteistoa haluttiin ohjata Simulink-mallin avulla, oli laitteiston ohjaukseen ja sieltä saataviin mittauksiin tehtävä ajurit. Kuten luvussa 3.1.4 *Navigointi-järjestelmän sähköiset liitännät* todettiin, on laitteita kytketty navigointi-järjestelmän alustana käytettyyn tietokoneeseen sekä CAN-väylän, RS-232 portin että RS-422 portin avulla.

CAN-väylään liittyneitä laitteita varten tehtiin kolme ajuria. Kaikki käyttivät itse väylän hallintaan CAN-adapterin ajuria, mutta päälle oli tehtävä CAN-viestien parsinta. Sekä traktorin hydraulikkaventtiilien ohjaukset että traktorin ECU:n kautta saatavat mittaukset ovat CAN-väylällä ISOBUS-standardin [10] mukaisina viesteinä. Auto-Guiden pyörienohjausmoduuli sen sijaan käytti omaa protokollaansa.

RS-232 porttiin liittyi ainoastaan GPS-vastaanottimet. Nämä käyttivät GPS-mittausten tiedonsiirtoon standardinmukaista NMEA-1083 protokollaa. Protokollasta käytettiin ainoastaan GGA ja VTC viestejä.

RS-422 porttia käyttävä laite saatiin liitettyä tietokoneeseen mediamuuntimen avulla. Sen vuoksi ajuriin oli tehtävä UDP-viestien lähetys ja vastaanotto sekä itse laserskanneerin oman protokollan mukainen mittausten parsinta. Koska laserskanneri lähetti mittauksia tarkasti 13 ms välein, käytettiin tätä myös koko järjestelmän kellon ajoittamiseen.

Yhteenveto navigointi-järjestelmään tehdyistä ajureista on taulukossa 6.

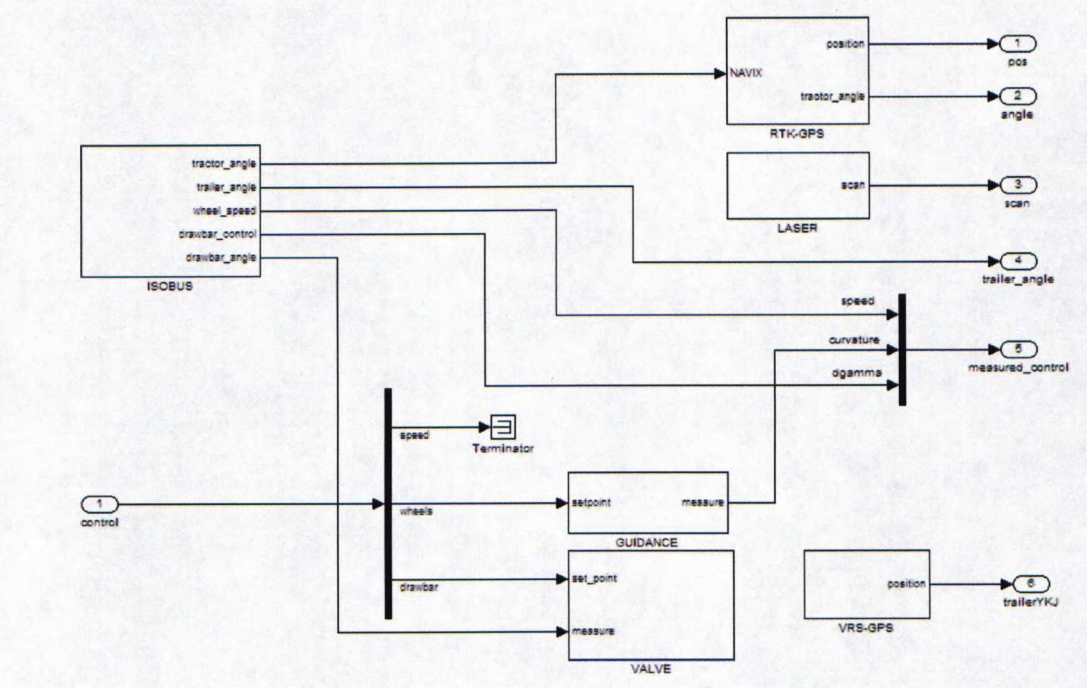
Taulukko 6. Järjestelmän simulink-ajurit

Ajuri	Liitäntä	Protokolla	Laite
CanValve	CAN	ISOBUS	Traktorin hydraulikkaventtiili
GPSDriver	RS-232	NMEA-1083	GPS vastaanottimet
GuidanceDriver	CAN	Auto-Guide oma	Auto-Guiden pyörienohjausmoduuli
ISOBUSDriver	CAN	ISOBUS	Traktorin ECU
LaserDriver	RS-422	SICK LMS221 oma	Laserskanneri



Ajurit toteutettiin Simulinkiin S-funktioiden avulla. S-funktio on C tai C++ kielellä koodattava määrätyn muotoinen dynaamisesti linkitettävä kirjasto, joka käännetään Matlabissa ajettavaan muotoon kääntäjän avulla. Kääntäjänä voidaan käyttää joko ulkoista C++-kääntäjää tai Matlabin mukana tullutta kevyttä kääntäjää.

Kuva siitä, miten tieto kulkee Simulink-mallissa ajuri-lohkon sisällä eri laitteiden ajureiden välillä, on kuvassa 15. Selkeyden vuoksi eri laitteita koskevat tietojen käsittelyt on koottu omien alilohkojensa sisälle. Yhdessä alilohkossa on kuitenkin vain yksi S-funktion eli ajurin sisältävä lohko ja Simulinkin puolella tehty signaalien jatkokäsittely.



Kuva 15. Tiedonkulku ajuri-lohkon sisällä



### 3.3 Menetelmät

Traktorin ja työkoneen automaattinen navigointi on kolmitasoinen. Ensimmäisellä ns. suunnittelutasolla yhdistelmälle luodaan haluttu polku, jota sen on tarkoitus seurata. Toisella ns. navigointitasolla tunnistetaan yhdistelmän nykyinen paikka suhteessa polkuun ja edelliseen työjälkeen sekä ohjataan yhdistelmää siten, että pysyttäisiin halutulla polulla ja vierekkäisten työjälkien väliin ei jäisi aukkoja tai tulisi päällekkäisyyksiä. Viimeinen ns. servotaso pyrkii pitämään toimilaitteet halutuissa ohjausarvoissa, jotka saadaan navigointitasolta. Tässä työssä on keskitytty pääasiassa toiseen eli navigointitasoon. Seuraavissa luvuissa on kuitenkin käyty läpi kaikki navigoinnissa käytetyt tasot siten, kuin niitä tässä työssä on käytetty.

#### 3.3.1 Polun luominen

Työkoneyhdistelmälle luodaan YKJ-koordinaatistoon polku, jota sen on tarkoitus seurata. Polku saadaan edellisen vedon nauhoitetusta työkoneen reitistä kopioimalla se haluttuun suuntaan työkoneen leveyden verran.

Kaavassa 17 on esitetty työkoneen koordinaattien  $(x_E, y_E)$  laskenta traktorin koordinaateista  $(x_R, y_R)$  mitattujen kulkusuunnan  $(\theta)$  ja aisan kulmien  $(\beta, \gamma)$  avulla. Kaavaan on yhdistetty myös koordinaattipisteiden suodatus. Kaavassa olevat vakiot  $(b, c, d)$  ovat luvussa 3.1.1 *Koordinaatistot, tilat ja parametrit* esitettyjä fyysisiä parametreja (akseliväli, työkoneen kiinnityspiste, aisan pituus).

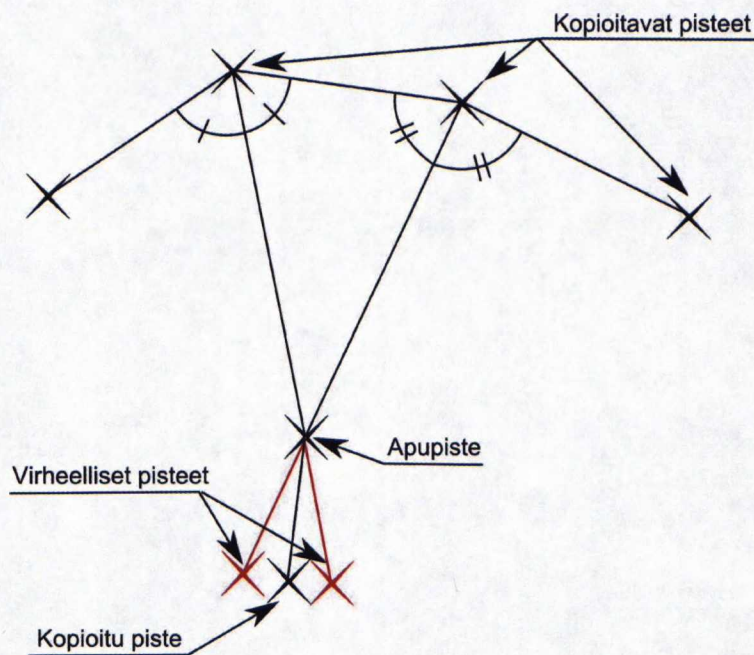
$$\begin{aligned} x_E(i) &= \frac{1}{5} \sum_{i=2}^{i+2} (x_R(i) - b \cos(\theta(i)) - c \cos(\theta(i) - \beta(i)) - d \cos(\theta(i) - \beta(i) - \gamma(i))) \\ y_E(i) &= \frac{1}{5} \sum_{i=2}^{i+2} (y_R(i) - b \sin(\theta(i)) - c \sin(\theta(i) - \beta(i)) - d \sin(\theta(i) - \beta(i) - \gamma(i))) \end{aligned} \quad (17)$$

Koordinaattipisteitä suodatetaan, sillä traktorin paikannuksessa käytetyn RTK-GPS:n kulkusuunnan mittaus sisältää kohinaa. RTK-GPS toimii 5 Hz taajuudella, joten käytetyillä ajonopeuksilla saadaan mittauspisteitä vähintään puolen metrin välein. Suodatuk-



sen jälkeen koordinaattipisteistä valitaan kopioitavaksi pisteiksi näytteet noin metrin välimatkoilta.

Kopioinnissa on otettava huomioon myös sisäkaarteessa kaarteeseen jyrkkeneminen ja peräkkäisten polun pisteiden mahdollinen risteäminen. Kuva 16 havainnollistaa tilannetta, jossa peräkkäisten pisteiden siirtäminen aiheuttaisi risteämisen.



Kuva 16. Polun pisteiden kopiointi jyrkässä mutkassa

Tällöin siirretään kopioitavaa ajolinjaa vain niin paljon, että siirrot eivät risteä. Suurin mahdollinen siirto saadaan kaavan 18 avulla

$$step = \min \left( \frac{\sqrt{\Delta x_E(i)^2 + \Delta y_E(i)^2}}{2 * \sin((\alpha_E(i+1) - \alpha_E(i)) / 2)} \right) \quad (18)$$

, jossa  $(\Delta x_E, \Delta y_E)$  on polun pisteen siirtymä edelliseen polun pisteeseen nähden,  $\alpha_E$  on polun tangentti kopioitavassa pisteessä ja  $step$  suurin mahdollinen siirtymä.



Polun tangentti lasketaan kaavan 19 mukaisesti.

$$\alpha_E(i) = \text{atan2}(\Delta y_E(i) + \Delta y_E(i-1), \Delta x_E(i) + \Delta x_E(i-1)) \quad (19)$$

Polun pisteiden siirto tehdään polun normaalin suuntaisesti kaavan 20 avulla

$$\begin{aligned} x_{E,new}(i) &= x_E(i) + \text{step} * \cos(\alpha_E(i) + \pi/2) \\ y_{E,new}(i) &= y_E(i) + \text{step} * \sin(\alpha_E(i) + \pi/2) \end{aligned} \quad (20)$$

, jossa  $(x_{E,new}, y_{E,new})$  ovat uudet kopioidut polun pisteet.

Kopioinnin jälkeen pisteistä poistetaan ne, joiden keskinäinen etäisyys on vähemmän kuin 25 cm ja tilalle laitetaan näiden pisteiden keskiarvo. Kopiointia jatketaan kunnes kaikki polun pisteet on kopioitu halutun etäisyyden päähän alkuperäisestä jäljestä.

### 3.3.2 Edellisen työjäljen tunnistaminen

Työjälki merkitään peltoon auraamalla kylvöalueen reunaan vako kylvökoneen perään asennetulla auralla (Kuva 17). Aura rakennettiin MTT:llä ja se asennettiin kylvölan-noittimen jälkiäkeen laitimmaiseen piikkiin. Vako on kuivalla maalla noin 5 cm syvä, pohjalta noin 10 cm leveä ja kokonaisuudessaan noin 18 cm leveä (Kuva 18). Vako ei osoittautunut liian suureksi, sillä se peittyi kylvökoneen toimesta seuraavalla vedolla. Kovalla ja märällä maalla jälki jää huomattavasti pienemmäksi kuin edellä on mainittu.

Valittu menetelmä todettiin kuitenkin huonoksi kolme metriä leveällä kylvökoneella, sillä traktorin pyörät kulkivat jäljen päältä ulkokaarteissa. Neljä metriä leveällä koneella valittu menetelmä sen sijaan toimisi paremmin. Kuitenkin jyrkemmissä mutkissa traktorin pyörät menisivät tämänkin jäljen päältä.





Kuva 17. Työjäljen reunan merkkauslaite



Kuva 18. Kylvetyn alueen reunaan tehty jälki.

Kylvöalueen reunassa oleva vako tunnistetaan laserskannerin avulla. Laserskanneri mittaa pellon profiilia kohtisuoraan ajosuuntaan ja peltoon nähden. Mittaustuloksena on 181 etäisyysmittausta asteen välein 13 ms sykliajalla. Neljä ajallisesti peräkkäistä mittausta keskiarvoistetaan, jolloin jäljen tunnistus tehdään 52 ms sykleillä. Keskiarvoistuksen jälkeen mittaukset muutetaan polaarikoordinaateista tasokoordinaateiksi, joissa x-akseli on maanpinnan suuntainen ja y-akseli osoittaa ylöspäin. Y-akselin nollakohta on oletetulla maanpinnan korkeudella. Muunnos on esitetty kaavassa 21.

$$\begin{aligned} x_G(i) &= r(i) * \sin(\theta(i)) \\ y_G(i) &= h - r(i) * \cos(\theta(i)) \end{aligned} \quad (21)$$

, jossa  $(x_G, y_G)$  on tasokoordinaateiksi muunnetut laserskannerin mittaukset  $(r, \theta)$  ja  $h$  on laserskannerin korkeus maanpinnasta. Muunnoksen jälkeen taso interpoloidaan jatkuvaksi neljän metrin leveydeltä sentin rasterilla, jolloin tuloksena on pellon profiili 400 lukua leveässä vektorissa (*plane*).

Pellon profiilista etsitään todellinen maataso sovittamalla mittauksiin suora edellisen löydetyn työjäljen ympäristöön. Kaavassa 22 on esitetty suoran parametrien



$(a, b | y = ax + b)$  laskentakaavat tasokoordinaateista  $(x_G, y_G)$  pienimmän neliösumman menetelmällä.

$$a = \frac{\bar{y}_G \left( \sum_{i=n_1}^{n_2} x_G(i)^2 \right) - \bar{x}_G \sum_{i=n_1}^{n_2} x_G(i) y_G(i)}{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_G(i)^2 - (n_2 - n_1) \bar{x}_G^2}$$

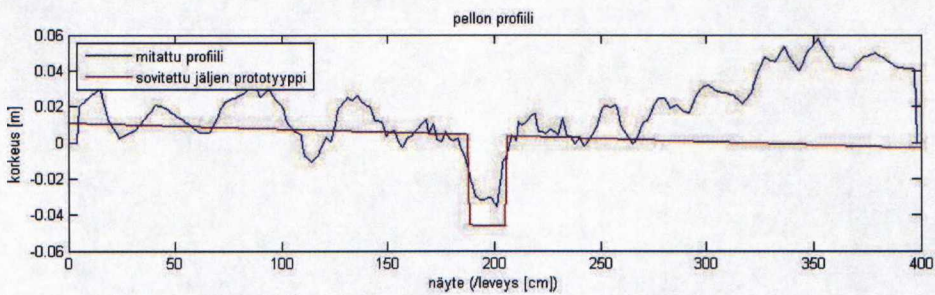
$$b = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_G(i) y_G(i) - (n_2 - n_1) \bar{x}_G \bar{y}_G}{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_G(i)^2 - (n_2 - n_1) \bar{x}_G^2} \quad (22)$$

, jossa  $[n_1, n_2]$  vastaa edellisen työjäljen lähistön pistejoukkoa. Oletus, että pelto on suora, toimii useimmissa tapauksissa riittävän hyvin.

Maatason löydettyä, mittauksesta etsitään merkin nykyinen paikka (*pos*) sovittamalla pellon profiiliin merkin prototyyppiä (*mark*) ja etsimällä paras korrelaatio kaavan 23 mukaisesti.

$$pos = \min_i \sum_{j=i-n}^{i+n} (plane(j) - (aj + b) - mark(j - i))^2 \quad (23)$$

Kuvassa 19 on havainnollistettu merkin prototyypin sovitusta pellon profiiliin.



Kuva 19. Pellon profiili, johon on sovitettu jäljen prototyyppi. Vaaka ja pystysuuntaisten akselien skaalat eivät ole samoja, vaan korkeuseroja on tarkoituksenmukaisesti korostettu.

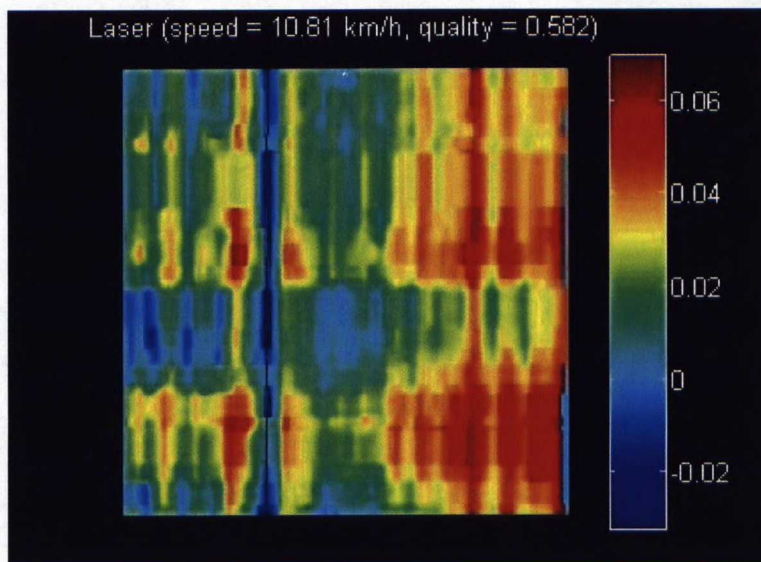


Jäljen hetkellistä tunnistusarvoa ei käytetä suoraan, vaan sitä suodatetaan viiden näytteen keskiarvoistavalla suodattimella, joka on esitetty kaavassa 24. Viiden näytteen keskiarvon laskennasta jätetään oikean ja vasemmanpuoleisin arvo pois, jolloin yksittäiset virhetunnistukset eivät häiritse suodatusta.

$$pos_{filt}(i) = \frac{\sum_{j=i-1}^{i+5} pos(i) - \min(\{pos(i-1 \dots i-5)\}) - \max(\{pos(i+1 \dots i+5)\})}{3} \quad (24)$$

Suodatuksen jälkeen tarkistetaan, että saatu suodatettu paikka ei poikkea liikaa edellisen syklin arvosta. Jos se poikkeaa, etsitään paras korrelaatio uudelleen sallitulta alueelta. Kuitenkin joka neljäs peräkkäinen poikkeava mittaus sallitaan, jotta suodatin ei jää lokaaliin minimiin.

Tunnistuksen jälkeen löydetyn jäljen paikalle lasketaan hyvyysarvo korrelaation sekä suodatuksen perusteella. Kuvassa 20 on peräkkäisistä mittauksista piirretty pellon profiili kuva sekä tunnistettu jäljen paikka.



Kuva 20. Vasemmalla pellon profiilikuva, johon on piirretty mustalla viivalla löydetty jäljen paikka. Oikealla on väriasteikko suhteelliselle poikkeamalle maatasosta metreissä.



### 3.3.3 Polunseuranta-algoritmit

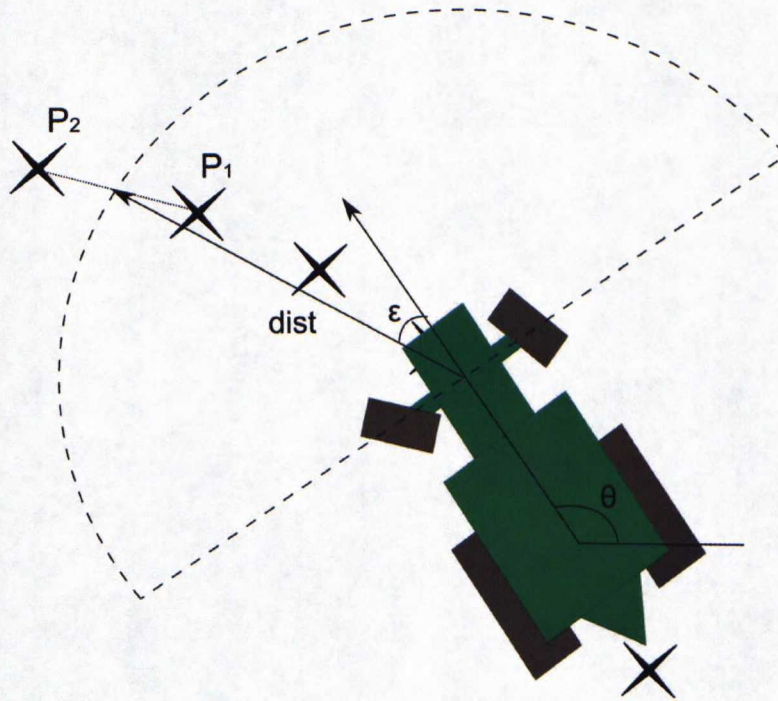
Tässä työssä on käytetty kahta erilaista polunseuranta-algoritmia: malliprediktiivistä säädintä sekä tähtäyspistemenetelmää. Molemmissa menetelmissä traktorin nykyinen paikka saatiin RTK-GPS:n avulla, suuntakulma sekä kallistuskorjaus saatiin Navix-järjestelmästä CAN-väylän välityksellä sekä edellisen työjälki tunnistettiin laserskannerin avulla. Nykyiset kaupalliset järjestelmät vaikuttaisivat käyttävän tähtäyspistemenetelmää pääasiallisena navigointimenetelmänä. Siksi se on otettu työhön referenssin tapaisena menetelmänä mukaan. Tähtäyspistemenetelmä on tarkoitettu pelkästään traktorin navigointiin. Tämän vuoksi aisan ohjaukseen on kehitetty oma erillissäädin, jotta menetelmien suorituskykyä voitaisiin vertailla.

#### 3.3.3.1 Tähtäyspistemenetelmä

Käytetty tähtäyspistemenetelmä muistuttaa luvussa 2.2.1.1 *pure-pursuit* esitettyä polunseuranta-algoritmia, mutta siinä ei ole sovitettu kaarta ajoneuvon ja tähtäyspisteen välille vaan tähtäyspisteeseen on pyritty pääsemään ajamalla sitä suoraan päin. Lisäksi on käytetty PID-säädintä pyörien ohjauksen säätämiseen tähtäyspisteen ja mitatun ajosuunnan kulman eron avulla. Myöhemmin tässä työssä tulosten yhteydessä tätä menetelmää kutsutaan TargetPoint-säätimen nimellä.

Traktorin navigoinnissa polulta etsitään traktorin etuakselin edessä vakioetäisyyden päässä oleva piste. Koska navigointipisteet sijaitsevat polulla metrin välimatkoin, interpoloidaan käytetty tähtäyspiste polun lähimpien pisteiden avulla. Kuva 21 havainnollistaa tilannetta, jossa tähtäyspiste osuu polun pisteiden välille.





Kuva 21. Tähtäyspistemethoden geometrinen asetelma

Ilman interpolointia suunta tähtäyspisteeseen muuttuisi askelmaisesti ja aiheuttaisi myös ohjaukseen suuria yksittäisiä muutoksia. Tähtäyspisteen koordinaattien  $(x_T, y_T)$  laskenta interpoloimalla polun lähimmistä pisteistä  $P_1$  ja  $P_2$  on esitetty kaavoissa 25.

$$\begin{aligned} x_T &= P_{1,x} + \frac{(dist - d_1)(P_{2,x} - P_{1,x})}{d_2 - d_1} \\ y_T &= P_{1,y} + \frac{(dist - d_1)(P_{2,y} - P_{1,y})}{d_2 - d_1} \end{aligned} \quad (25)$$

, jossa  $dist$  on haluttu tähtäyspisteen etäisyys ja  $d_1$  sekä  $d_2$  polun pisteiden euklidiset etäisyydet etuakselin keskipisteestä  $(x_F, y_F)$  laskettuna kaavojen 26 mukaisesti.

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(P_{1,x} - x_F)^2 + (P_{1,y} - y_F)^2} \\ d_2 &= \sqrt{(P_{2,x} - x_F)^2 + (P_{2,y} - y_F)^2} \end{aligned} \quad (26)$$



Interpoloinnin jälkeen suuntausvirhe ( $\varepsilon$ ) tähtäyspisteeseen saadaan laskettua kaavan 27 avulla.

$$\varepsilon = \text{atan2}(y_F - y_T, x_F - x_T) - \theta \quad (27)$$

, jossa  $\theta$  on traktorin suuntakulma. Suuntavirhettä käytetään erosuurena PID säätimessä, jonka ulostulona on suoraan curvaturen arvo. PID säädin on kaavan 28 tyyppinen. Muutoksena tavalliseen PID säätimeen integraattorin summa nollataan kun erosuureen arvo tulee lähelle nollaa. Nollauksen avulla saatiin ohjauksen ylityksen määrää vähennettyä, sillä prosessi itsessään on jo integroiva.

$$u = K\varepsilon + I \sum \varepsilon + D\Delta\varepsilon \quad (28)$$

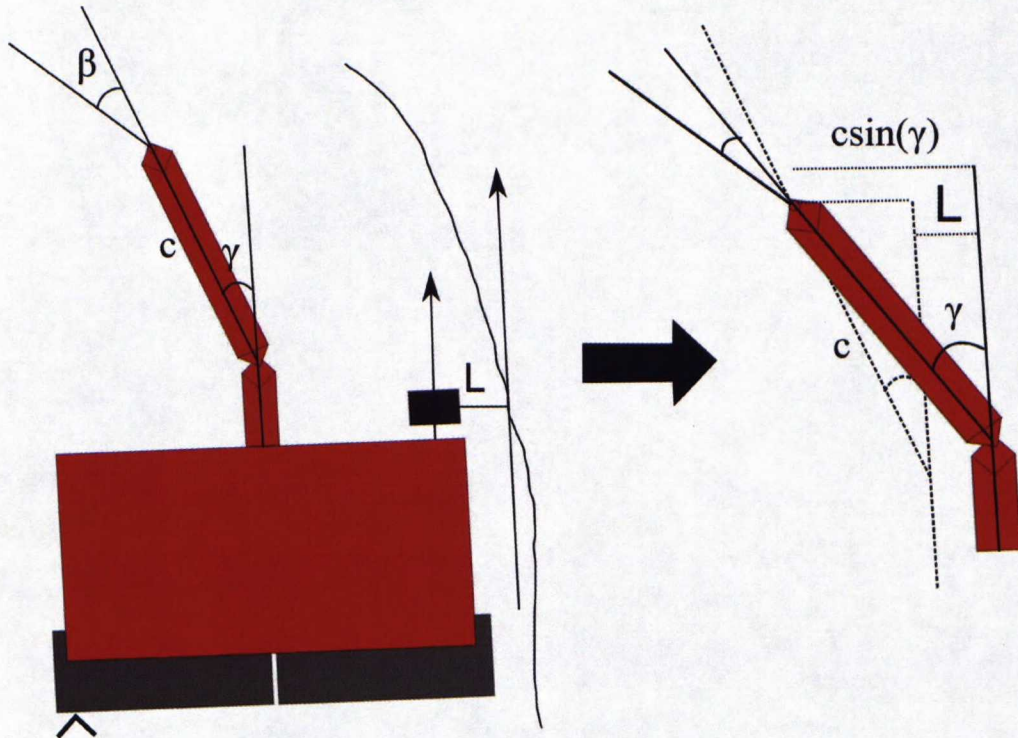
Parhaaksi tähtäyspisteen etäisyydeksi havaittiin 4 metriä. Tällä tähtäyspisteen etäisyydellä PID säätimen parametreiksi viritettiin vahvistuksen arvoksi 170 ja integraattorin arvoksi 5. Derivaattatermiä ei käytetty ollenkaan.

Työssä käytetyssä algoritmissa tähtäyspisteen etäisyyttä ei muutettu nopeuden mukaan. Yleisesti käytetyn tähtäyspisteen etäisyyden tulisi muuttua ajonopeuden funktiona ja etäisyys tulisi säätää jokaiselle ajonopeudelle erikseen. Optimaalinen ajonopeus käytetyllä tähtäyspisteen etäisyydellä oli 8-10km/h, joten kaikki testiajotkin tehtiin näillä nopeuksilla.



### 3.3.3.2 Aisan erillissäädin

Työkoneen aisaa ohjattiin erillisen säätimen avulla tähtäyspistemenetelmän yhteydessä. Kuva 22 havainnollistaa laserskannerin mittaamaa työkoneen kohtisuoraa poikkeamaa ( $L$ ) edellisestä ajolinjasta. Jäljen sekä ajolinjan oletetaan jatkuvan suorana työkoneen suuntaisesti.



Kuva 22. Aisan säädön geometria

Kuvaan 22 on merkitty aisan ohjattava kulma ( $\gamma$ ), työkoneen ja traktorin välinen kulma ( $\beta$ ) ja aisan pituus ( $c$ ). Työkonetta ohjataan siten, että työkoneen ajolinja sekä laserin ilmoittaja jälki olisivat päällekkäin. Kuvan oikeassa reunassa on havainnollistettu ohjattavan aisan avulla tapahtuvaa siirtymää normaaliin ajolinjaan nähden.



Työkoneen siirtymä ( $\Delta T$ ) normaalista ajolinjasta saadaan ohjattavasta kulmasta ja aisan pituudesta laskettua kaavan 29 mukaisesti.

$$\Delta T = c \sin(\gamma) \quad (29)$$

Kaavassa oletetaan, että työkonene seuraa ajolinjan suuntaisesti traktorin perässä, eikä luistamista sivusuunnassa tapahdu.

Koska laserskanneri mittaa poikkeamaa edellisestä ajolinjasta, saadaan tämän ja nykyisen siirtymän normaalista ajolinjasta avulla laskettua uusi siirtymä normaalista ajolinjasta ( $\Delta T_{new}$ ), johon tulisi pyrkiä.

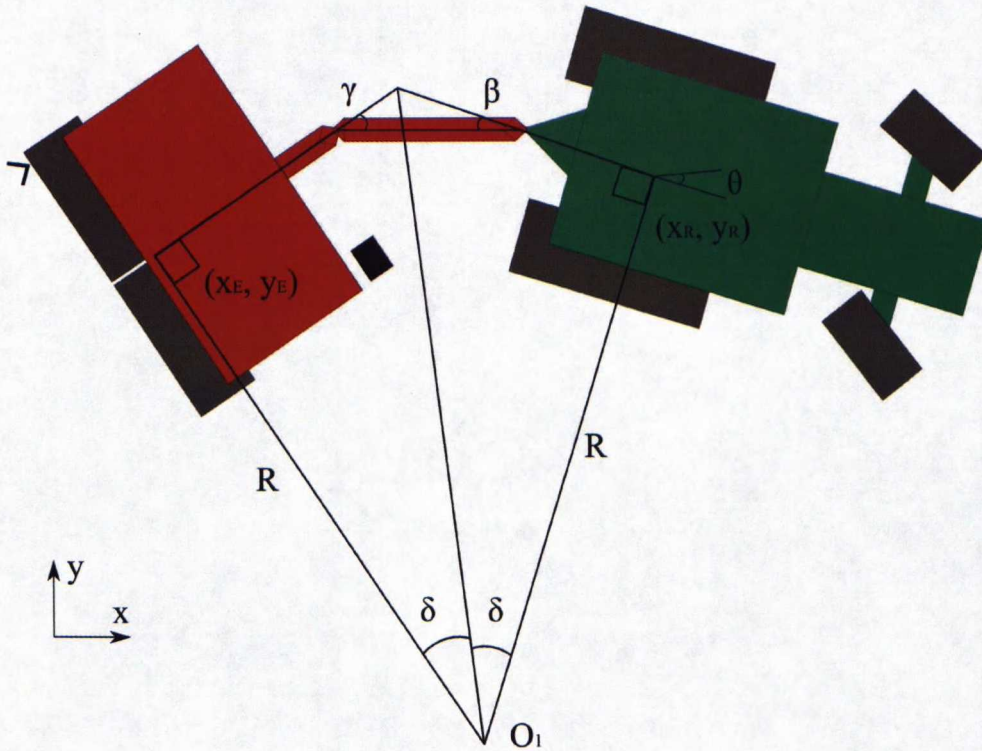
$$\Delta T_{new} = \Delta T + L \quad (30)$$

Kaavojen 29 ja 20 avulla laskettu uusi ohjauskulma ( $\gamma_{new}$ ) on kaavassa 31 ilmoitettu nykyisen ohjauskulman ja laserskannerin mittaaman poikkeaman avulla.

$$\gamma_{new} = \sin^{-1}(\sin(\gamma) + L/c) \quad (31)$$

Laserskanneri ei kuitenkaan koko ajan tunnista edellistä ajojälkeä luotettavasti. Jos aisia ohjattaisiin kaavan 31 mukaisesti jatkuvasti, aiheuttaisi se nopeita ja virheellisiä aisan korjausliikkeitä silloin, kun ajojälkeä ei pystytä tunnistamaan. Tunnistuksessa olevaa hyvyyslukua voidaan käyttää tämän estämiseen. Tilanteessa, jossa jälkeä ei ole tunnistettu oikein on kaksi vaihtoehtoa: pitää aisa edellisessä kulmassaan tai ohjata aisia mitatun aisan vapaan kulman avulla. Järkevin tapa on pyrkiä ohjaamaan työkonetta kulkemaan samaa ajolinjaa traktorin kanssa. Tähän voidaan johtaa geometrisesti kaava kuvan 23 mukaisesta tilanteesta käyttäen hyväksi aisan vapaan nivelen mitattua kulmaa. Kaavan ratkaisu on esitetty Mathematican avulla liitteessä 1.





Kuva 23. Aisan ohjauskulman laskenta yhdenmuotoisista kolmioista tilanteessa, jossa työkonse seuraa traktorin ajolinjaa

Aisan ohjauskulman analyyttinen laskentakaava osoittautui monimutkaiseksi. Koelaitteiston fyysisillä parametreilla kaavan 32 mukainen numeerinen laskentakaava kuitenkin approksimoii analyyttisen kaavan arvoja riittävän hyvin.

$$\gamma_{new} = 5.5713\beta - 13.7402\beta^3 \quad (32)$$

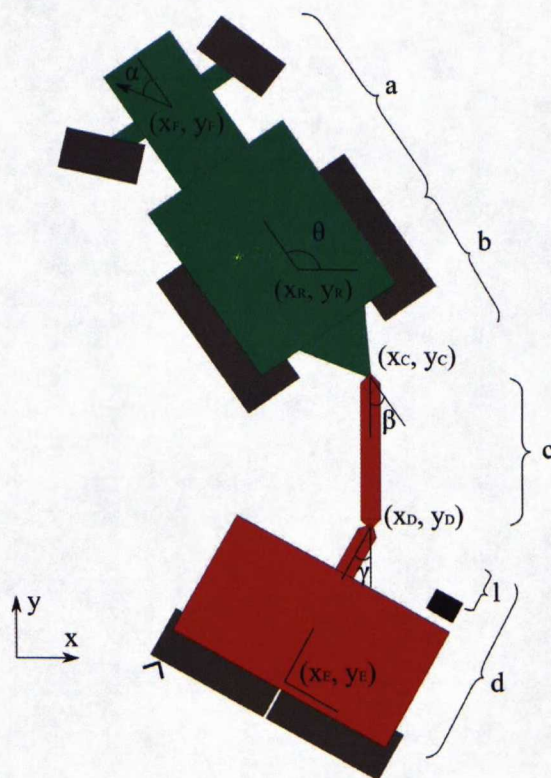
Kaavoja 31 ja 32 käytettiin työkonse ohjauksessa yhdessä traktorin tähtäyspistemennetelmän kanssa.



### 3.3.3.3 Malliprediktiivinen säädin

Malliprediktiivisen säätimen peruskaavat on esitetty luvussa 2.2.2 *Malliprediktiivnen säädin*. Malliprediktiivinen säädin nimensä mukaisesti ennustaa systeemin mallin avulla systeemin tilan muutoksia ja tämän perusteella laskee optimaaliset ohjaussuureen arvot halutulle ennustushorisontille. Säädin tarvitsee toimiakseen matemaattisen mallin säädetystä systeemistä. Tässä luvussa ei käydä uudelleen säätimen peruskaavoja lävitse vaan johdetaan työssä käytetyn järjestelmän kinemaattinen malli, joka on muokattu Matlab Model Predictive Control Toolbox – työkalun käyttämään muotoon.

Luvussa 3.1.1 *Koordinaatistot, tilat ja parametrit* on lueteltu traktori-työkone yhdistelmän kinemaattisen mallin tilat, ohjaukset ja parametrit. Nämä on havainnollistettu uudelleen kuvassa 24. Malliprediktiivisen säätimen mallissa nopeus on ilmaistu mitattava häiriönä, sillä traktorin ajonopeutta ei voida testilaitteistossa sähköisesti ohjata.



Kuva 24. Traktori-työkone yhdistelmän fyysiset mitat sekä mallin tilat ja apupisteet



Kuvaan 24 on mallin tilojen ja fyysisten parametrien lisäksi merkitty traktorin etuakselin paikka  $(x_F, y_F)$ , työkoneen kiinnityspisteen paikka  $(x_C, y_C)$ , ohjattavan nivelen paikka  $(x_D, y_D)$  sekä työkoneen akselin keskipiste  $(x_E, y_E)$ . Kaikki paikat on ilmoitettu globaalissa YKJ-koordinaatistossa. Näiden paikkojen sijainnit suhteessa traktorin origon paikkaan  $(x_R, y_R)$  voidaan laskea geometrisesti kaavojen 33 mukaisesti, kun fyysiset mitat tiedetään.

$$\begin{cases} x_F = x_R + a \cos(\theta) \\ y_F = y_R + a \sin(\theta) \\ x_C = x_R - b \cos(\theta) \\ y_C = y_R - b \sin(\theta) \\ x_D = x_C - c \cos(\theta - \beta) \\ y_D = y_C - c \sin(\theta - \beta) \\ x_E = x_D - d \cos(\theta - \beta - \gamma) \\ y_E = y_D - d \sin(\theta - \beta - \gamma) \\ x_L = x_D - l \cos(\theta - \beta - \gamma) \\ y_L = y_D - l \sin(\theta - \beta - \gamma) \end{cases} \quad (33)$$

Edellä mainittujen sijaintien muutosta globaalissa koordinaatistossa sekä laserskannerin mittaaman poikkeaman muutosta käytetään lähtökohtana kinemaattisen mallin johtamisessa. Tässä on oletettu, että laserskannerin mittaama jälki jatkuu suorana työkoneen suuntaisesti. Oletus johtuu siitä, että laserskanneri ei mittaa jäljen kulmaa suhteessa työkoneeseen vaan ainoastaan sivuttaissuuntaista etäisyyttä. Johdossa on lisäksi oletettu että luistamista ei tapahdu. Tarkemmin sanottuna kaikkien akseleiden kulkusuuntaan vasten kohtisuorat nopeusvektorit ovat nollija ja traktorin taka-akselin kulkusuunnan nopeusvektorin suuruus on ajonopeus ( $v$ ). Oletukset on ilmaistu matemaattisessa muodossa kaavoissa 34.



$$\begin{cases} \dot{x}_R \cos(\theta) + \dot{y}_R \sin(\theta) \equiv v \\ -\dot{x}_R \sin(\theta) + \dot{y}_R \cos(\theta) \equiv 0 \\ -\dot{x}_F \sin(\theta + \alpha) + \dot{y}_F \cos(\theta + \alpha) \equiv 0 \\ -\dot{x}_E \sin(\theta - \beta - \gamma) + \dot{y}_E \cos(\theta - \beta - \gamma) \equiv 0 \\ \dot{L} = -\dot{x}_L \sin(\theta - \beta - \gamma) + \dot{y}_L \cos(\theta - \beta - \gamma) \end{cases} \quad (34)$$

Traktori-työkone yhdistelmän kinemaattisen mallin tilojen muutokset voidaan ratkaista analyttisesti kaavoista 33 – 34 ohjattavien suureiden suhteen, jolloin saadaan seuraavat kaavat 35. Ratkaisu Mathematican avulla on esitetty liitteessä 2.

$$\begin{cases} \dot{x}_R = v \cos(\theta) \\ \dot{y}_R = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \frac{v \tan(\alpha)}{a} \\ \dot{\beta} = \frac{-av \sin(\beta + \gamma) + v(d + c \cos(\gamma) + b \cos(\beta + \gamma)) \tan(\alpha) - ad\dot{\gamma}}{a(d + c \cos(\gamma))} \\ \dot{L} = \frac{(d - l)(v(\cos(\gamma)(a \sin(\beta) - b \cos(\beta) \tan(\alpha)) + \sin(\gamma)(a \cos(\beta) + b \sin(\beta) \tan(\alpha))) - ac \cos(\gamma)\dot{\gamma})}{a(d + c \cos(\gamma))} \end{cases} \quad (35)$$

Johdettu kinemaattinen malli voidaan ilmaista jatkuva-aikaisena tilamallina (engl. state space). Malli on kaavan 36 mukainen.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, n_x) \\ y &= h(x, u, n_y) \end{aligned} \quad (36)$$

, jossa funktio  $f$  sisältää kinemaattisen mallin yhtälöt (kaavat 35) ja  $h$  on mittausfunktio (kaavat 33). Malliin on lisätty myös valkoista kohinaa häiriöiden ja mallinnusvirheiden vuoksi. Lisäksi tilat on yhdistetty vektoriin  $x$ , ohjaukset vektoriin  $u$  ja mittaukset vektoriin  $y$  kaavojen 37 ilmaisemalla tavalla.

$$\begin{aligned} x &= [x_R \quad y_R \quad \theta \quad \beta \quad \gamma \quad L]^T \\ u &= [v \quad \alpha \quad \dot{\gamma}]^T \\ y &= [x_R \quad y_R \quad \theta \quad \beta \quad \gamma \quad L \quad x_F \quad y_F \quad x_E \quad y_E]^T \end{aligned} \quad (37)$$



Koska työssä käytetty ohjelmisto (Matlab Model Predictive Control Toolbox) ei tue epälineaarisia malleja, on malli linearisoitava malliprediktiivistä säädintä varten. Malli linearisoidaan toimintapisteessään  $(x_0, u_0, y_0)$  laskemalla Jacobin matriisit, jotka on ilmaistu kaavoissa 38.

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0}, \mathbf{B} = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{u_0}, \mathbf{C} = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_0}, \mathbf{D} = \left. \frac{\partial h}{\partial u} \right|_{u_0} \quad (38)$$

Linearisoitunut malli on kaavojen 39 mukainen.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}\Delta x + \mathbf{B}\Delta u + \mathbf{B}_n n_x + \dot{x}_0 \\ y &= \mathbf{C}\Delta x + \mathbf{D}\Delta u + \mathbf{D}_n n_y + y_0 \end{aligned} \quad (39)$$

Mallissa olevat fyysiset rajoitukset ovat traktorin ja työkonteen välinen kulman ääriarvot  $(\beta^{\min}, \beta^{\max})$ , työkonteen ohjattava kulman ääriarvot  $(\gamma^{\min}, \gamma^{\max})$ , traktorin pyörien ohjauskulman ääriarvot  $(\alpha^{\min}, \alpha^{\max})$  sekä työkonteen ohjattavan kulman ohjausnopeuden  $(\dot{\gamma}^{\min}, \dot{\gamma}^{\max})$  ääriarvot. Lisäksi linearisoitu malli ei ole riittävän tarkka, jos todellinen suuntakulma poikkeaa liikaa linearisointipisteestä. Tämän vuoksi myös traktorin suuntakulman muutos linearisointipisteestä on rajoitettu välille  $[-\frac{1}{2}\pi, \frac{1}{2}\pi]$ . Säätimessä malli linearisoidaan aina uudelleen, jos nykyinen kulma on muuttunut enemmän kuin  $\frac{1}{16}\pi$  radiaania edellisestä linearisointipisteestä. Rajoitukset on koottu kaavoihin 40.

$$\begin{cases} \theta_0 - \frac{1}{2}\pi \leq \theta \leq \theta_0 + \frac{1}{2}\pi \\ \beta^{\min} \leq \beta \leq \beta^{\max} \\ \gamma^{\min} \leq \gamma \leq \gamma^{\max} \\ \alpha^{\min} \leq \alpha \leq \alpha^{\max} \\ \dot{\gamma}^{\min} \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}^{\max} \end{cases} \quad (40)$$



### 3.3.4 Toimilaitteiden ohjaus

Traktorin toimilaitteet ovat sähköhydraulisesti ohjatut. Sekä pyörien ohjausventtiiliä että aisan ohjausventtiiliä ohjataan CAN-väylän avulla.

Aisan ohjausventtiili on ISOBUS yhteensopiva, joten tämän komentamiseen käytettiin ISOBUS standardissa [10] olevia viestejä. Viestit olivat yleisiä traktorin venttiilien ohjausviestejä, joilla venttiilin asentoa pystyttiin vaihtamaan. Ylemmältä tasolta tulevat ohjauskäskyt puolestaan sisältävät aisan halutun kulman. Tämän vuoksi aisan ohjaukseen oli tehtävä oma servo säädin, joka säätö ohjausventtiilin asentoa halutun ja mitatun aisan kulman mukaan. Tähän tarkoitukseen käytettiin normaalia PID-säädintä.

ISOBUS arkkitehtuurin mukaan myös traktorin ohjaavia pyöriä voitaisiin komentaa väylän kautta, jos traktori täyttää luokan 3N vaatimukset. Tässä työssä käytetyssä traktorissa ei kuitenkaan vielä ollut tätä ominaisuutta, ja tämän vuoksi pyörien ohjauksessa käytettiin traktoriin asennettua Agco:n valmistamaa Auto-Guide laitteistoa ja sen omaa CAN-väylää. Auto-Guiden pyörien ohjausmoduuli piti sisällään servo säätimen, joten ohjausviesti yksinkertaisesti sisälsi traktorin halutun kaartosäteen käänteisarvon (curvature). Haluttu kaartosäde pystytään laskemaan ylemmältä tasolta tulevan pyörien ohjauskulman ja akselivälin avulla yksinkertaisella kaavalla. Samantapainen viesti on määritetty myös ISOBUS standardissa, joten ohjausväylän vaihtaminen ei vaatisi kovin suuria muutoksia ohjausjärjestelmään.



## 4 Tulokset

Säätimiä vertailtiin todellisella laitteistolla tehdyillä mittauksilla. Säätimet viritettiin ensin simulaattorilla ja lopulliset parametrit haettiin koeajoilla asfaltilla sekä pellolla. Todellinen järjestelmä poikkesi ensimmäisistä simuloinneista hyvin paljon. Malli ei sisältänyt kaikkia todellisuudessa olevia parametria, kuten luistamista ja massan hitautta. Tämän vuoksi simulaattorissa ja todellisuudessa saadut tulokset algoritmien hyvyydestä olivat erilaisia. Sää ei ollut armollinen testausaikana ja pellolla tehtävät säädöt sekä mittaukset jäivät vähäisiksi. Sen vuoksi säätimiä ei saatu viritetyksi aivan loppuun asti eivätkä mittaustulokset siksi ole riittäviä pitkällemenevien johtopäätösten tekemiseen.

Testeissä saadut tarkkuudet eivät ole absoluuttisia. Navigoinnin tarkkuus muodostuu navigointiin käytetyn signaalin (GPS) tarkkuudesta, navigointiohjelmiston tarkkuudesta, parametrien oikeellisuudesta, seurattavasta polusta sekä vallitsevista olosuhteista [11]. Kaivosoja on käsitellyt diplomityössään navigointijärjestelmien suorituskyvyn mittausten menetelmiä, joiden avulla järjestelmän eri osien tarkkuutta ja osuutta virheiden syntymiseen voitaisiin mitata [16]. Virheiden lähteisiin ei tässä työssä ole kuitenkaan kiinnitetty huomiota, vaan testeissä on mitattu kokonaisjärjestelmän kykyä seurata haluttua reittiä, jolloin tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia eri algoritmeilla ja eri olosuhteissa tehtyihin mittauksiin.

Testeissä käytetyn RTK-GPS antamaa paikkaa on pidetty absoluuttisena paikkatietona ja navigointivirheet on laskettu poikkeamina RTK-GPS:n ilmoittaman paikan ja halutun polun välillä. Todellisuudessa tämä paikkatieto sisältää myös värillistä kohinaa.

Työkoneen paikka on mitattu VRS-GPS laitteistolla. Laitteiston antamaa paikkatietoa ei käytetty säätötarkoituksiin, vaan sen avulla on pelkästään laskettu työkoneen poikkeamaa halutulta polulta. Tuloksissa on analysoitu myös RTK-GPS:n signaalista kul-



mamittausten avulla laskettua työkoneen paikkaa sekä laserskannerin mittaamaa poikkeamaa halutusta polusta.

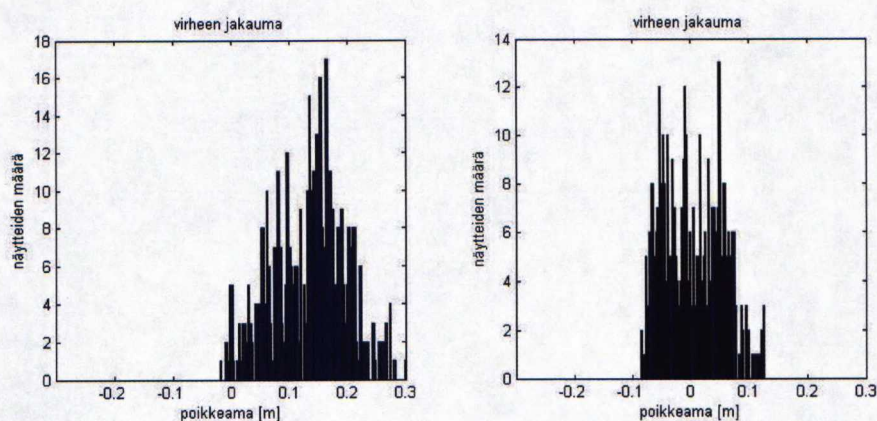
Kriteereinä testeissä on käytetty stabiilisuutta, asettumisaikaa sekä yleistä seurantavirhetä. Näitä on pyritty selvittämään askelvaste-tyyppisillä kokeilla, eri jyrkkyyksien kaarien seuranta-kokeilla sekä suoran polun seurannalla. Vertailtavina suureina askelvasteko-keissa on ollut asettumisnopeus, värähtelytaajuus sekä virheen aikaintegraali. Muissa kokeissa vertailtavat suureet ovat olleet virheen keskiarvo sekä keskihajonta. Testit ovat samantyyppisiä, kuin mitä Roth Stephan on käyttänyt omassa tutkimuksessaan eri polunseurantamenetelmien hyvyttä mitattaessa [21].



## 4.1 Suoran polun seuranta

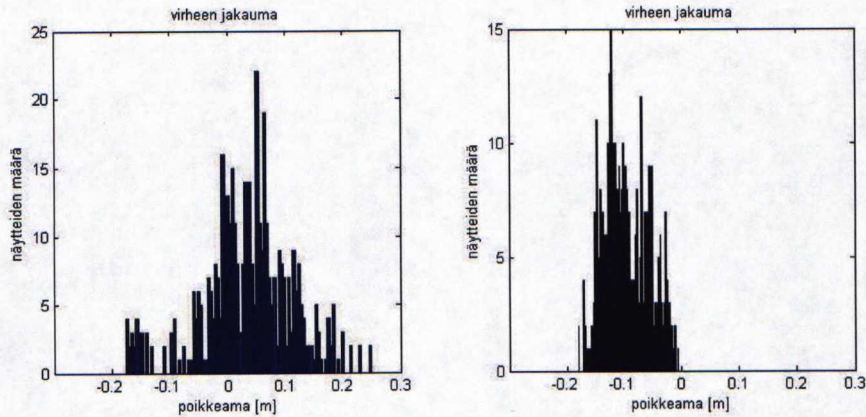
Suoran polun seurannalla on tarkisteltu säätimen kykyä pysyä halutulla reitillä muuttumattomassa tilanteessa sekä pysyvän virheen määrää.

Suoran polun seurantatesti suoritettiin tasaiselle pellolle vedetyllä suoralla jäljellä, jossa nauhoitetun seurattavan polun pisteet olivat metrin välein. Ajonopeuksina käytettiin 8 km/h ja 10 km/h nopeuksia. Kuvissa 25–27 on sekä traktorin että työkoneen seuranta-  
virheiden jakaumat MPC- ja TargetPoint-säätimillä sekä TargetPoint-säätimellä yhdessä aisan erillisen säätimen kanssa. Jakaumat on laskettu 8 km/h nopeudella tehdyillä ajoilla. Seurantavirheet on laskettu RTK-GPS:n sekä VRS-GPS:n paikkatietojen koh-tisuorina poikkeamina halutulta polulta.

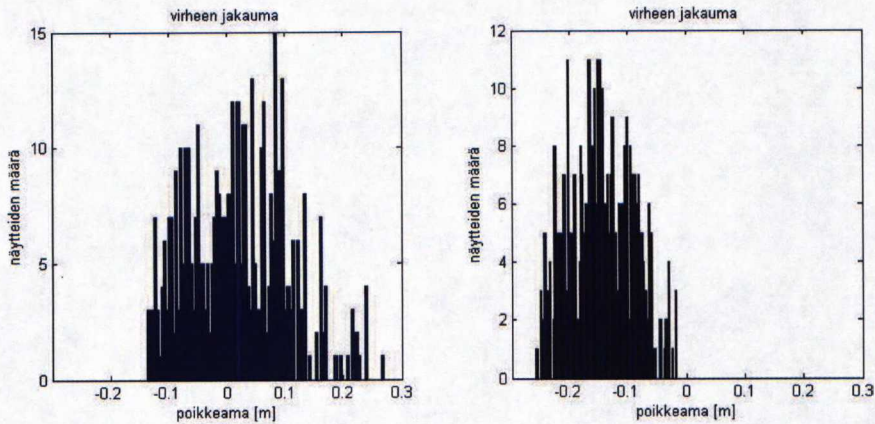


Kuva 25. Seurantavirheen jakauma käyttäen MPC-säädintä. Vasemmalla on traktorin virhe RTK-GPS:n signaalista laskettuna ja oikealla työkoneen virhe VRS-GPS:n signaalista laskettuna.





Kuva 26. Seurantavirheen jakauma käyttäen TargetPoint-säädintä yhdessä aisan säädön kanssa.

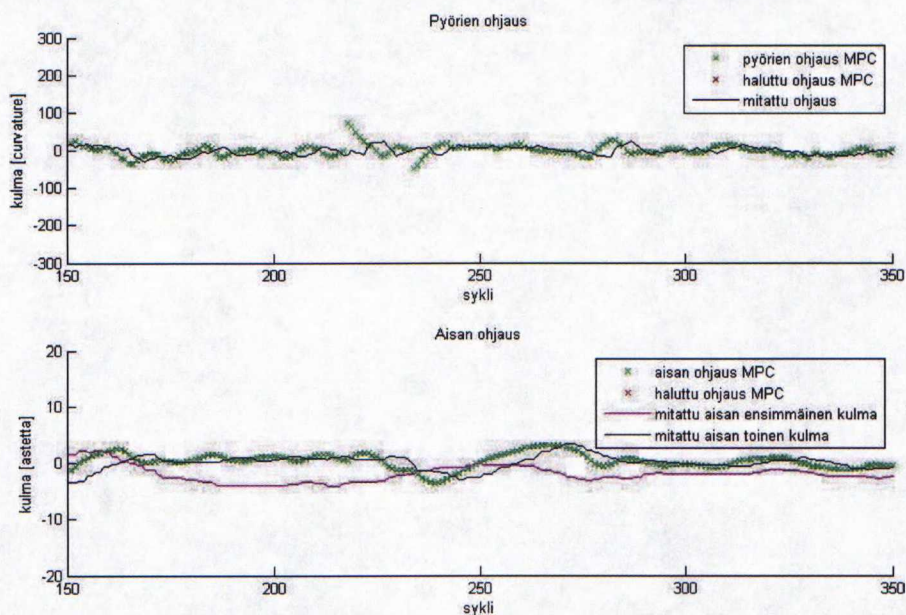


Kuva 27. Seurantavirheen jakauma käyttäen TargetPoint-säädintä.

Kuvien 25–27 jakaumista nähdään, että työkonne on seurannut tarkimmin haluttua reittiä MPC-säädintä käyttäen, vaikkakin traktori on pysynyt reitillään huonoimmin kyseisellä säätimellä. Traktori on seurannut tarkimmin reittiä TargetPoint-säädintä käyttäen ja aisan ohjauksen ollessa päällä työkonneen virheen hajonta on pienempi kuin ilman ohjausta. Eroavaisuudet selittynevät sillä, että TargetPoint-säätimessä traktorin ja työkonneen paikkaa säädetään erillisillä toisistaan riippumattomilla säätimillä, vaikka työkonneen paikka on riippuvainen traktorin paikasta. MPC-säätimellä säädetään sekä traktorin paikkaa, että työkonneen paikkaa samalla säätimellä, jolloin traktorin paikan virhe on toisarvoinen työkonneen paikkaan nähden.

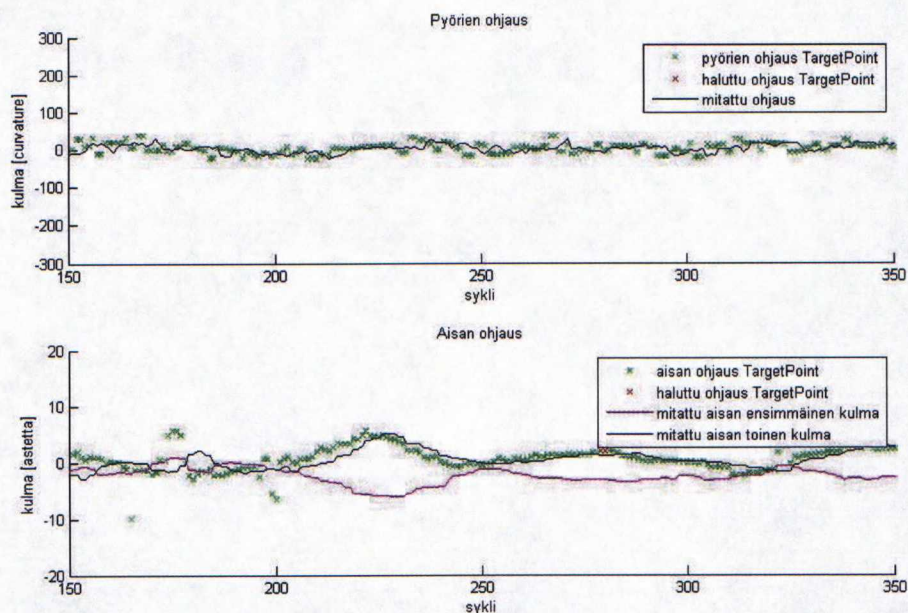


Kuvissa 28 ja 29 on 10 km/h nopeudella tehdyillä ajoilla ohjaussuureiden arvot noin 20 sekunnin ajanjaksolta. Traktorin ohjauksen arvoväli on  $[-300, 300]$  ja aisan ohjauksen  $[-17, 17]$ . Molemmissa kuvissa ohjaukset pysyvät arvovälin keskellä pienellä alueella, joten suuria ohjauksia ei kumpikaan säädin ole kyseisenä ajanvälinä tehnyt. Koska seurattava polku on jatkunut kyseisellä ajanvälillä suorana, ovat ohjaukset seurausta pellon epätasaisuuksista johtuvista poikkeamista sekä paikan mittauksen epätarkkuudesta. Kuvista nähdään, että MPC-säädin on hieman rauhallisempi ohjausarvojen muutoksissa kuin TargetPoint-säädin. Tämä vaikuttaa suoraan kuljettajan kokemaan ajotuntumaan ja näkyy myös jonkin verran ajatussa jäljessä.



Kuva 28. Ohjauksien arvot 10 km/h ajossa käyttäen MPC-säädintä





Kuva 29. Ohjauksien arvot 10 km/h ajossa käyttäen TargetPoint-säädintä

Taulukkoon 7 on koottu suoran polun seurantatestin tulokset. Testeissä käytettiin molemmille testatuille nopeuksille omaa jälkeä, mutta samaa jälkeä kaikille kolmelle testatulle menetelmälle. Testatut ajonopeudet olivat 8 km/h ja 10 km/h. Menetelmät olivat MPC- ja TargetPoint-säätimet sekä TargetPoint-säädin aisan ohjauksen kanssa.

Taulukkoon on kerätty sekä traktorin että työkoneen poikkeamien keskiarvot ( $\bar{\epsilon}$ ) että keskihajonnat ( $D(\epsilon)$ ). Traktorin poikkeama on laskettu RTK-GPS:n mittaaman paikan kohtisuorana poikkeamana seurattavasta polusta. Työkoneen poikkeama on puolestaan laskettu VRS-GPS:n mittaaman paikan kohtisuorana poikkeamana seurattavasta polusta. Tämän lisäksi taulukkoon on laitettu RTK-GPS:n mittaaman paikan sekä aisan mitattujen kulmien avulla lasketun työkoneen paikan poikkeaman seurattavasta polusta sekä laserskannerin avulla mitatun poikkeaman painotettu keskiarvo. Laserskannerin avulla saatua poikkeamaa on painotettu tunnistuksen hyvyysarvolla siten, että jäljen ollessa varmasti tunnistettavissa on molempien painoarvot samoja. Kun jälkeä ei voitu tunnistaa ollenkaan, on käytetty pelkästään RTK-GPS:n avulla laskettua poikkeamaa.



Taulukkoon on merkitty myös jäljen tunnistuksen onnistumisprosentti ja käytetty ajonopeus. Jäljen tunnistuksen onnistumisprosentti kertoo minkä osan ajasta laserskannerin tuottamasta pellon profilista on onnistuttu tunnistamaan edellinen ajojälki varmasti.

Taulukko 7. Traktorin ja työkoneen poikkeamat halutusta reitistä kahdella suoralla polulla

	Menetelmä	$v$ [km/h]	Jäljen tunnistus [%]	Traktorin poikkeama		Työkoneen poikkeama (VRS)		Työkoneen poikkeama (RTK+Laser)	
				$\bar{\epsilon}$ [m]	$D(\epsilon)$ [m]	$\bar{\epsilon}$ [m]	$D(\epsilon)$ [m]	$\bar{\epsilon}$ [m]	$D(\epsilon)$ [m]
Jälki 1	MPC	8	80	0.13	0.06	0.01	0.05	0.11	0.13
	TargetPoint +aisan säätö	8	84	0.03	0.08	-0.09	0.04	-0.05	0.11
	TargetPoint	8	72	0.02	0.09	-0.15	0.05	-0.09	0.13
Jälki 2	MPC	10	77	0.18	0.08	0.07	0.06	0.09	0.10
	TargetPoint +aisan säätö	10	85	-0.01	0.08	-0.13	0.04	-0.10	0.08
	TargetPoint	10	92	0.07	0.09	-0.31	0.05	-0.26	0.09

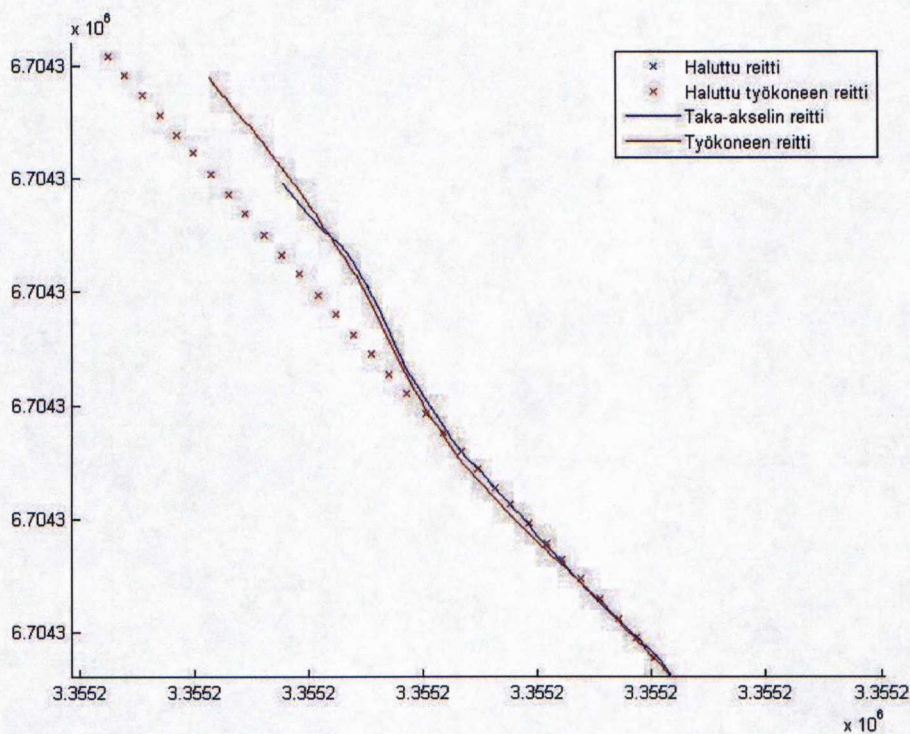
Taulukkoon 7 kootuista seurantavirheiden jakaumien tunnusluvuista huomataan samat asiat, mitä aikaisemmin kuvien 21–23 jakaumista. MPC-säätimen avulla työkone seuraa tarkimmin haluttua reittiä. Hajonta on kaikkia säätimiä käyttäen kuitenkin hyvin pieni. Täyttä varmuutta, mikä säädin seuraa parhaiten suoralla reitillä, ei koemenetelmällä saatu selville. Paikan mittauksessa käytetyt eri mittalaitteet sisälsivät erilaisia virheitä, jotka näkyvät myös tuloksissa. Tarkempia tuloksia olisi saatu mittaamalla metri- mitalla kylvökoneen kulkemaa reittiä pellolla.



## 4.2 Lähtö jäljen sivusta

Edellisellä testillä testattiin säätimen kykyä pysyä halutulla reitillä muuttumattomassa tilanteessa. Tällä testillä pyrittiin testaamaan kuinka nopeasti eri säätimet reagoivat muutoksiin halutussa polussa. Askelvasteen kaltaisella testillä saatiin myös viitteitä eri säädinten stabiilisuudesta kokeissa käytetyllä virityksellä.

Todellisissa olosuhteissa testattiin kolmella eri nopeudella kaikilla kolmella säätimillä yhdistelmän asettumista halutulle reitille. Traktoria ajettiin halutulla nopeudella työkoneen leveyden verran seurattavan jäljen sivusta, jonka jälkeen automaattiohjaus käynnistettiin. Seuratut reittipisteet sekä MPC-säätimellä 8 km/h nopeudella ajettu reitti on kuvassa 30.



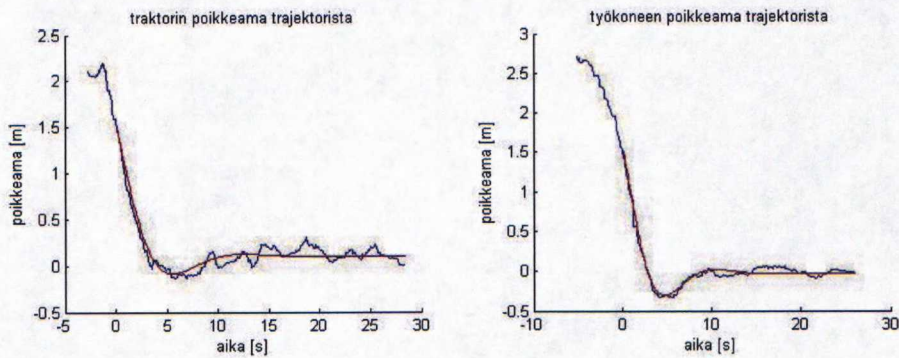
Kuva 30. Testissä käytetyt polun pisteet ovat punaisilla rasteilla merkittyinä. Sinisellä viivalla on traktorin taka-akselin reitti MPC-säätimellä 8 km/h nopeudella ajettuna sekä punaisella viivalla työkoneen reitti VRS-GPS:n mittaamana.



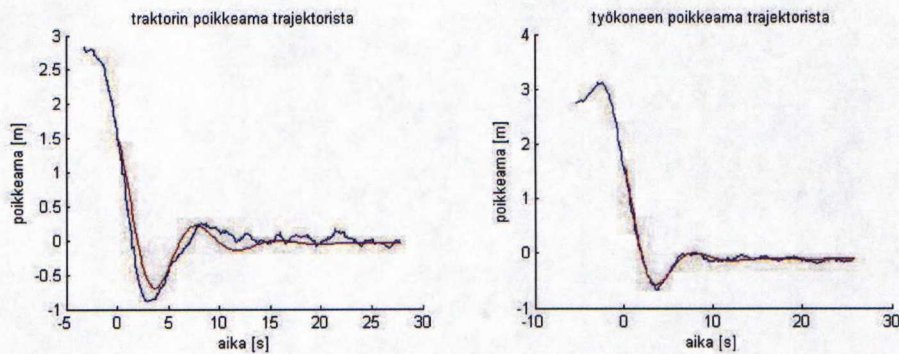
Kuvissa 31–33 ovat traktorin sekä työkoneen ohjauspisteiden kohtisuorat poikkeamat halutusta trajektorista kaikkia kolmea säädintä käyttämällä. Poikkeamiin on sovitettu kaavan 41 mukainen yhtälö.

$$y = y_0 \exp(-t/\sigma) \cos(\omega t) + y_1 \quad (41)$$

, jossa  $\sigma$  on laskuaika ja  $\omega$  värähtelytaajuus. Roth Stephan on käyttänyt samaa kaavaa askelvastekokeissa tutkiessaan polunseuranta-algoritmien suorituskykyä. [21]

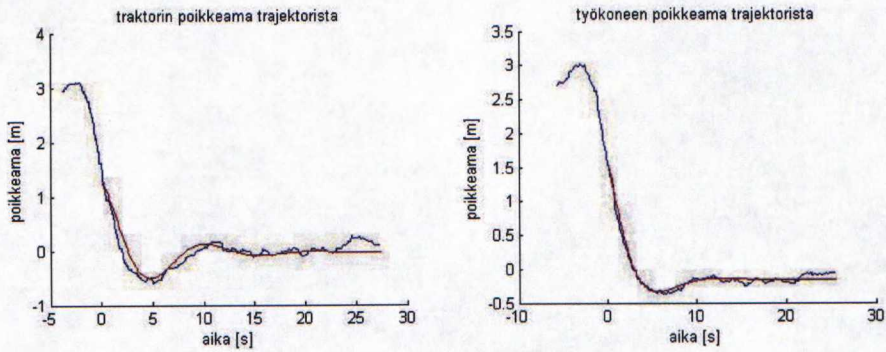


Kuva 31. Traktorin ja työkoneen asettuminen halutulle polulle MPC-säätimellä. Sinisellä on poikkeama halutusta polusta ja punaisella sovitettu asettumiskäyrä.



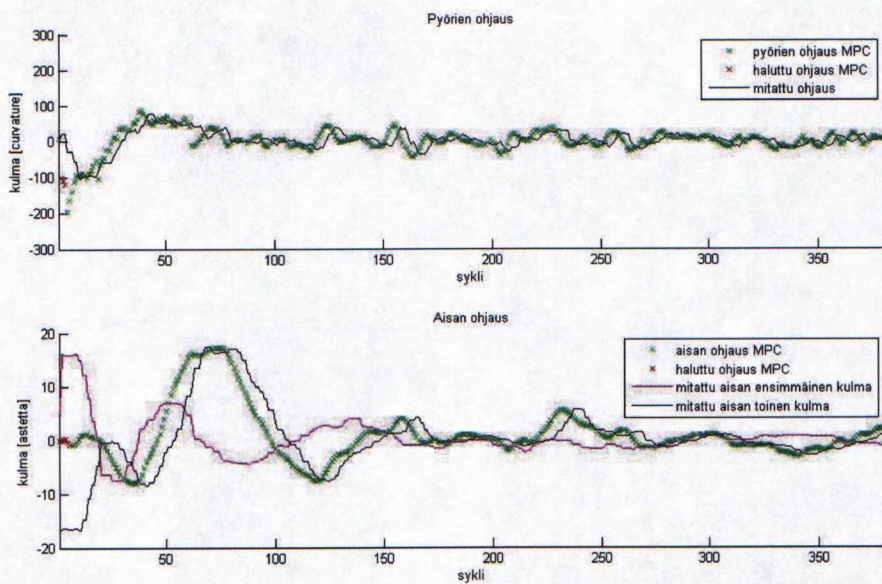
Kuva 32. Traktorin ja työkoneen asettuminen halutulle polulle TargetPoint-säätimellä yhdessä aisan ohjauksen kanssa. Sinisellä on poikkeama halutusta polusta ja punaisella sovitettu asettumiskäyrä.





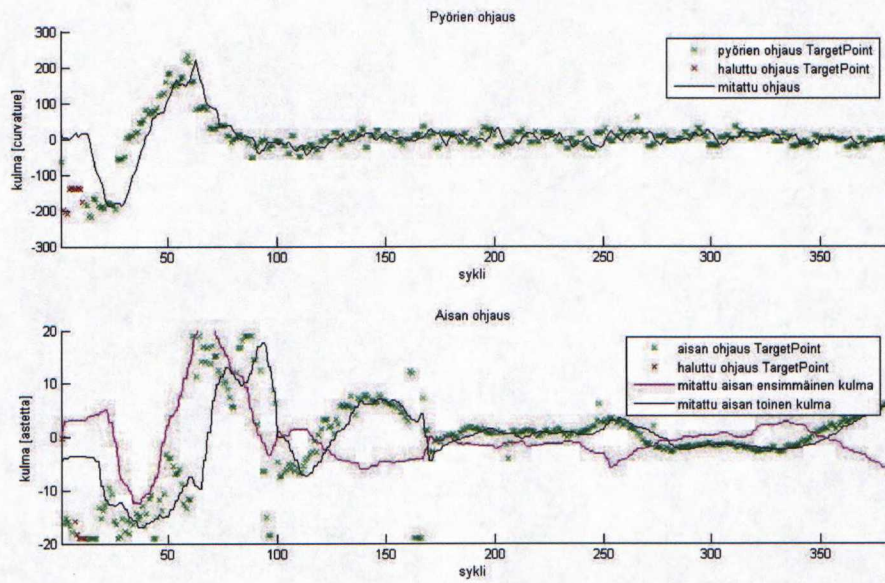
Kuva 33. Traktorin ja työkoneen asettuminen halutulle polulle TargetPoint-säätimellä jäykällä aisalla. Sinisellä on poikkeama halutusta polusta ja punaisella sovitettu asettumiskäyrä.

Kuvissa 34–36 ovat ohjaussuureiden arvot samoista testiajoista, kuin kuvissa 31–33 olevat poikkeamat. Vaikka yhdistelmä asettuu seurattavalle polulle lähestulkoon yhtä nopeasti kaikilla menetelmillä, ovat ohjaussuureiden muutokset hillityimpiä MPC säädintä käyttäen. Lisäksi kuvissa liilalla piirretty aisan vapaan kulman arvot ovat lähellä nollaa MPC-säätimellä ja muilla vaihtelevat suuresti. Tämä kertoo MPC-säätimen kyvystä ennakoita työkoneen haluttu liikesuunta.

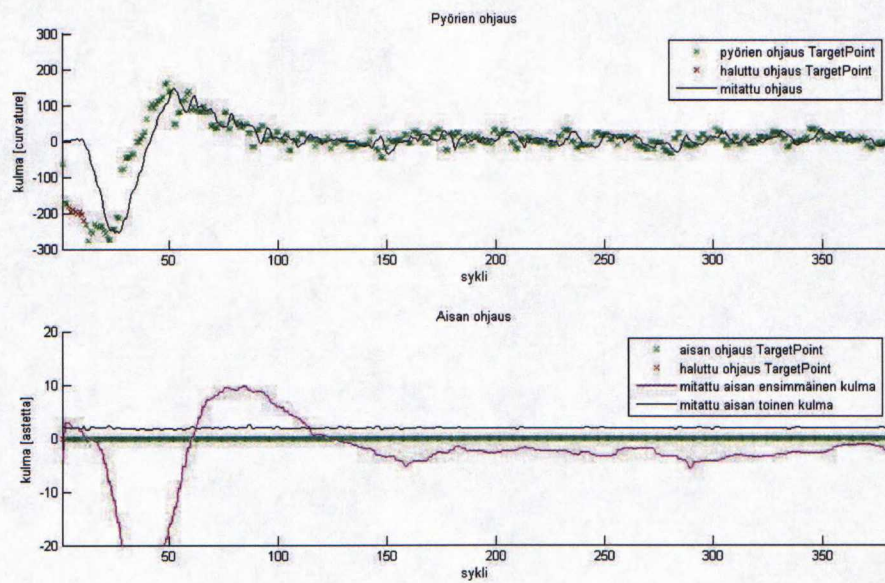


Kuva 34. Ohjaussuureiden arvot käyttäen MPC-säädintä





Kuva 35. Ohjaussuureiden arvot käyttäen TargetPoint-säädintä ja aisan erillistä ohjausta



Kuva 36. Ohjaussuureiden arvot käyttäen TargetPoint-säädintä.



Taulukkoon 8 on kerätty askelvastetestien tulokset. Testit tehtiin 8 km/h, 10 km/h ja 12 km/h nopeuksilla. Jokaista nopeutta varten tehtiin peltoon oma seurattava jälkensä. Kuitenkin jokaista säädintä testattiin samalla jäljellä. Testattavina säätiminä olivat MPC- sekä TargetPoint-säätimet sekä TargetPoint-säädin aisan säädön kanssa. Vertailtavina suureina ovat laskuaika ( $\sigma$ ), värähtelytaajuus ( $\omega$ ) sekä virheen aikasumma ( $\sum|\epsilon|$ ). Vertailtavat suureet on saatu sovittamalla seurantavirheisiin kaavan 41 mukainen yhtälö.

Taulukko 8. Testeissä saadut laskuajat, värähtelytaajuudet sekä virheiden aikasummat.

			Traktori			Työkone		
	Menetelmä	$v$ (km/h)	$\sigma$ (s)	$\omega$ (s <sup>-1</sup> )	$\sum \epsilon $	$\sigma$ (s)	$\omega$ (s <sup>-1</sup> )	$\sum \epsilon $
Jälki 1	MPC	8	3.05	0.45	100	3.03	0.54	149
	TargetPoint + aisan säätö	8	4.37	0.78	130	2.98	0.73	190
	TargetPoint	8	4.90	0.59	149	2.81	0.44	203
Jälki 2	MPC	10	4.92	0.44	153	7.16	0.45	171
	TargetPoint + aisan säätö	10	2.94	0.57	90	4.58	0.45	140
	TargetPoint	10	4.52	0.28	82	5.42	0.18	142
Jälki 3	MPC	12	4.76	0.81	218	4.55	0.86	267
	TargetPoint + aisan säätö	12	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	TargetPoint	12	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

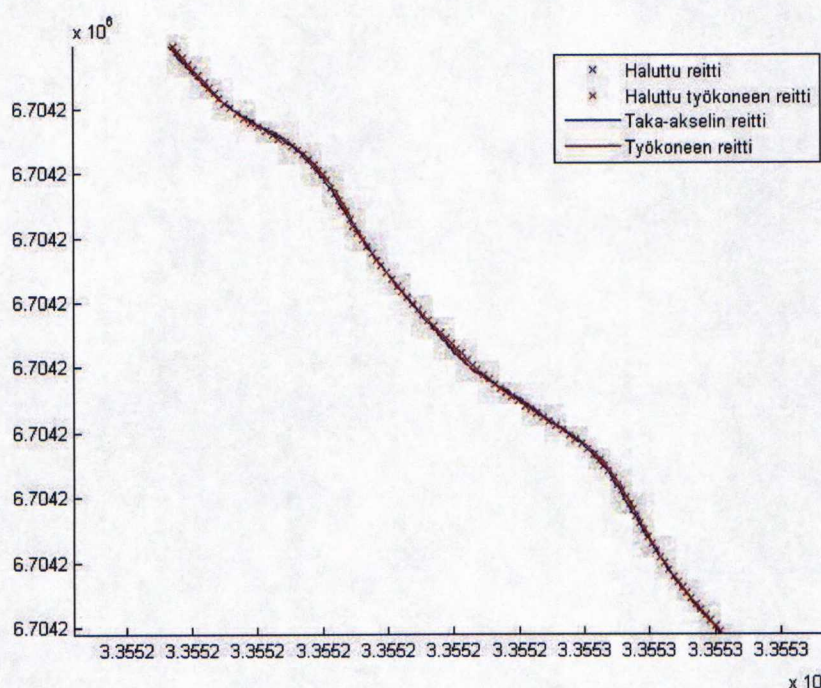
12 km/h nopeudella TargetPoint-säädin muuttui epästabiiliksi, joten tällä ajonopeudella ei saatu vertailukelpoisia tuloksia. TargetPoint-säädin on viritetty 10 km/h nopeudella eikä nopeuskompensointia ole, joten epästabiili käyttäytyminen oli odotettavissa. MPC-säätimessä nopeuskompensointi on sisäisesti olemassa järjestelmän kinematiikan kaavojen ansiosta, joten saadut tulokset ovat samankaltaisia kaikilla kolmella nopeudella.



### 4.3 Väistökoe

Väistökokeilla pyrittiin selvittämään samoja asioita kuin edellisellä askelvastetestillä eli säätimien kykyä seurata jäljessä olevia muutoksia. Tällä kertaa muutokset ovat kuitenkin jatkuvia ja esiintyvät vetojen aikana, kun taas edellisen testin tilanne on mahdollista lähinnä vedon alussa polun seurantaan lähtiessä.

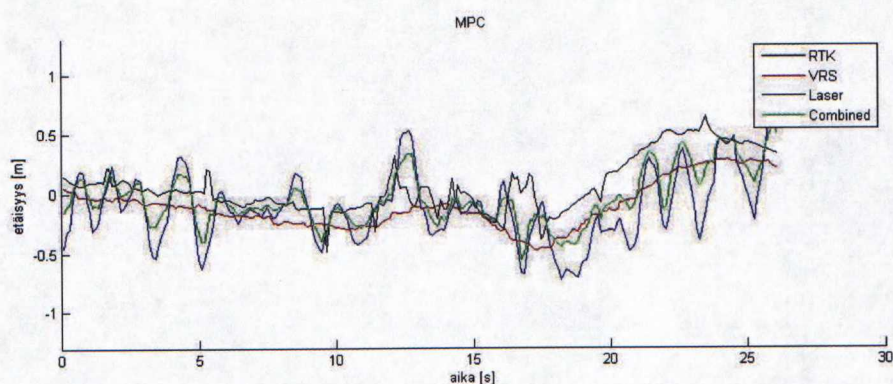
Testi suoritettiin kahdessa osassa. Ensimmäisessä jäljessä oli 3.8 metrin poikkeama 35 metrin matkalla sekä 2.3 metrin poikkeama 21 metrin matkalla. Tällä jäljellä ajettiin kaikilla säätimillä testit 8 km/h nopeudella. Toisessa jäljessä oli 2.9 metrin poikkeama 30 metrin matkalla sekä 2 metrin poikkeama 23 metrin matkalla. Tällä jäljellä ajettiin kaikilla säätimillä testit 10 km/h nopeudella. Ensimmäinen jälki sekä MPC-säätimellä ajettu reitti on kuvassa 37.



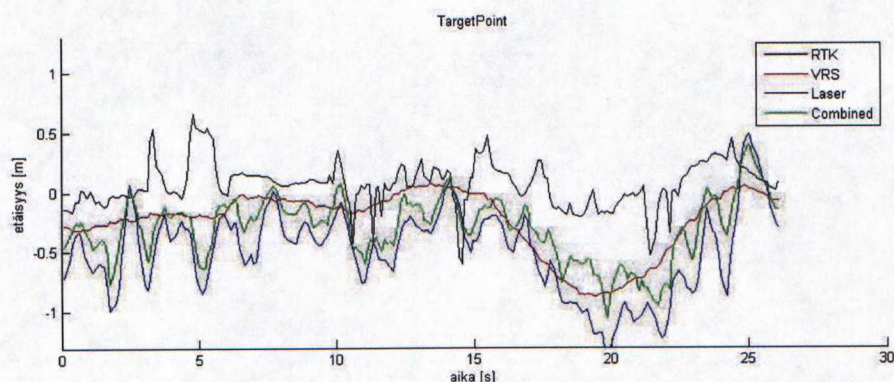
Kuva 37. Väistökokeessa seurattu jälki. Reittipisteet ovat kuvassa yhden metrin välein.



Kuvissa 38–40 on esitettyä työkoneen poikkeama halutusta polusta jälkimmäisen (Kuvassa 37 ylemmän) väistön kohdalla. Poikkeama on laskettu RTK-GPS:n paikan avulla, VRS-GPS:n mittaaman paikan avulla sekä laserskannerin avulla. Lisäksi kuvaan on piirretty RTK-GPS:n ja laserskannerin avulla mitattujen poikkeamien painotettu keskiarvo. Poikkeamat on piirretty kaikkiin kuviin samalla skaalalla. Pienimmät poikkeamat on kuvien mukaan saavutettu käyttäen MPC-säädintä.

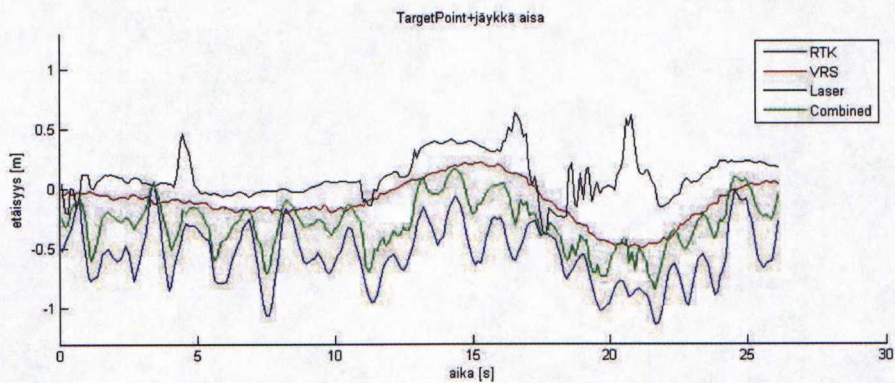


Kuva 38. Työkoneen poikkeama seurattavasta polusta jälkimmäisen väistön kohdalla RTK:lla, VRS:llä, laserskannerilla sekä laserskannerin ja RTK:n yhdistelmällä laskettuna. Käytettynä navigointialgoritmina ajossa oli MPC.



Kuva 39. Kuva samasta tilanteesta kuin kuvassa 34, mutta käytettynä navigointialgoritmina ajossa oli TargetPoint yhdessä aisan säädön kanssa.





Kuva 40. Kuva samasta tilanteesta kuin kuvassa 34, mutta käytettynä navigointialgoritmina ajossa oli TargetPoint.

Väistökokeen testien tulokset on kerätty taulukkoon 9. Taulukoon on koottu samat asiat kuin suoran jäljen seurantatestien tuloksissa, eli traktorin ja työkoneen poikkeamien keskiarvo ja keskihajonta sekä käytetty nopeus ja jäljen tunnistuksen onnistuminen.

Taulukko 9. Traktorin ja työkoneen poikkeamat halutusta reitistä kahdella eri nopeudella

				Traktorin poikkeama		Työkoneen poikkeama (VRS)		Työkoneen poikkeama (RTK+Laser)	
	Menetelmä	$v$ [km/h]	Jäljen tunnistus [%]	$\bar{\varepsilon}$ [m]	$D(\varepsilon)$ [m]	$\bar{\varepsilon}$ [m]	$D(\varepsilon)$ [m]	$\bar{\varepsilon}$ [m]	$D(\varepsilon)$ [m]
Jälki 1	MPC	8	71	0.10	0.19	-0.06	0.19	0.02	0.22
	TargetPoint + aisan säätö	8	56	0.04	0.23	-0.17	0.17	-0.25	0.21
	TargetPoint	8	75	0.03	0.20	-0.11	0.11	-0.28	0.16
Jälki 2	MPC	10	84	0.22	0.23	N/A	N/A	-0.03	0.28
	TargetPoint + aisan säätö	10	86	0.04	0.18	-0.13	0.05	N/A (0.03)	N/A (0.10)
	TargetPoint	10	91	0.04	0.19	-0.12	0.10	N/A	N/A



10 km/h ajoissa työkoneen aisan ensimmäisen kulman kalibrointi oli muuttunut kymmenen astetta, joten RTK:sta laskettu työkoneen paikka poikkesi todellisesta merkittävästi. Koska aisan erillinen säädin ei ota huomioon RTK-GPS:stä laskettua paikkaa, on taulukkoon laitettu myös pelkästään laserskannerin mittaaman poikkeaman keskiarvo ja keskihajonta sulkuihin. Samasta syystä myös MPC-säätimellä VRS:stä laskettu navigointivirhe sekä yhdistetty navigointivirhe poikkeavat toisistaan huomattavasti. MPC-säädin käyttää sekä RTK:sta laskettua työkoneen paikkaa, että laserskannerin mittaamaa etäisyyttä työkoneen ja traktorin ohjaamiseen.

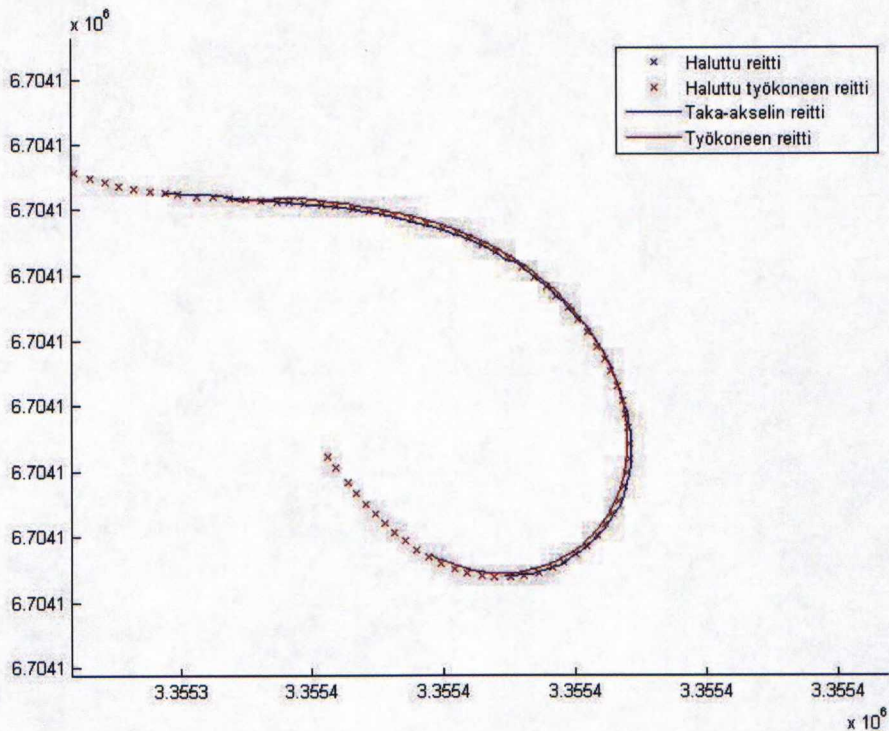
Taulukosta nähdään, että sekä MPC- että TargetPoint-säädin yhdessä aisan säädön kanssa ovat pitäneet säädön erosuureen keskiarvoisesti lähellä nollaa. MPC-säädin käyttää kuitenkin enemmän mittauksia hyväkseen kuin TargetPoint-säädin, joten säätimistä riippumattomasti VRS-GPS:llä mitattuna seurantavirheen keskiarvo on ollut lähempänä nollaa MPC-säädintä käyttäen. Virheiden keskihajonta on samaa suuruusluokkaa kaikilla säätimillä.



#### 4.4 Jyrkän mutkan seuranta

Viimeisenä testinä oli mutkan seurantatesti.

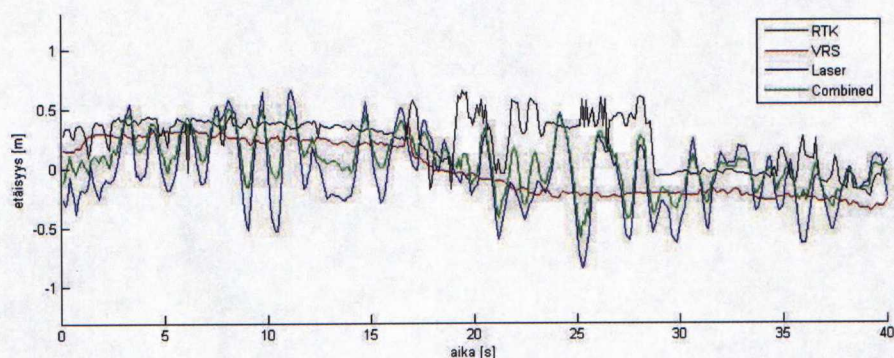
Jyrkän mutkan seurannassa käytettiin polkua, jonka alussa mutka alkoi säteeltään yhdeksän metrin kokoisen ympyrän kaaren seurantana ja muuttui säteeltään 20 metrin kokoisen ympyrän kaaren seurannaksi. Muutos ei ollut askelmainen vaan tapahtui liukuvasti. Kuvassa 41 on esitetty seurattava polku ja MPC-säätimellä ajettu reitti. Polku on ajettu vastapäivään, joten laserskanneri oli ulkokaaren puolella.



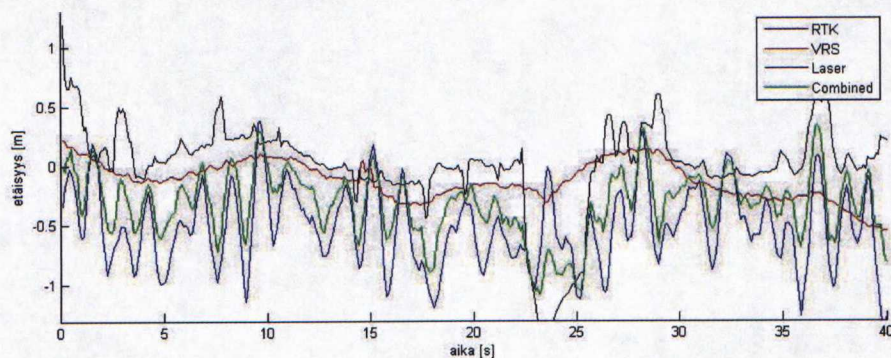
Kuva 41. Jyrkän mutkan seurannassa käytetty polku



Kuvissa 42–44 on työkoneen poikkeama esitettyä kuvaan 41 piirretyltä matkan ajalta. Negatiivinen virhe tarkoittaa, että mitattu piste on ollut polun oikealla puolella ja positiivinen vasemmalla puolella. Kuvaajista nähdään, että käyttäen aisan ohjausta on työkone pysynyt lähellä haluttua reittiä. Ilman ohjausta on työkone oikaissut mutkassa ja ajautunut sisäkurvin puolelle. Oleellista eroa TargetPoint- ja MPC-säätimissä ei kuvaajista näe.

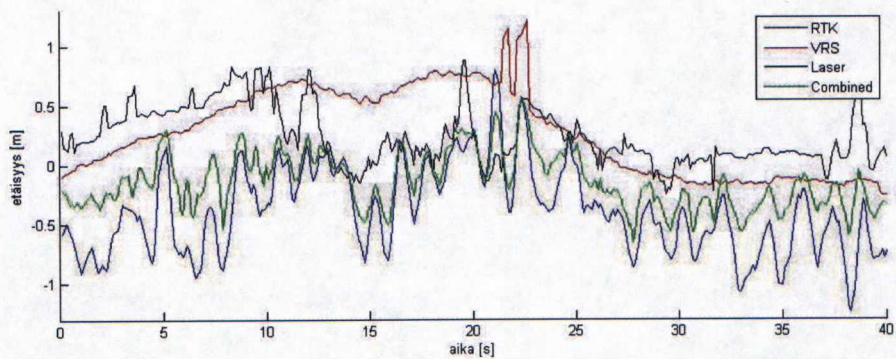


Kuva 42. Työkoneen seurantavirhe jyrkässä mutkassa MPC-säädintä käyttäen.



Kuva 43. Työkoneen seurantavirhe jyrkässä mutkassa TargetPoint-säädintä ja aisan ohjausta käyttäen.





Kuva 44. Työkoneen seurantavirhe jyrkässä mutkassa TargetPoint-säädintä käyttäen.

Taulukkoon 10 on kerätty jyrkän mutkan seurantatestin tulokset. Taulukoituina arvoina ovat samat kuin aikaisemmissa testeissä, eli traktorin ja työkoneen poikkeamien keskiarvo ja keskihajonta sekä käytetty nopeus ja jäljen tunnistuksen onnistumisprosentti.

Taulukko 10. Traktorin ja työkoneen poikkeamat halutusta reitistä jyrkässä mutkassa

Menetelmä	$v$ [km/h]	Jäljen tunnistus [%]	Traktorin poikkeama		Työkoneen poikkeama (VRS)		Työkoneen poikkeama (RTK+Laser)	
			$\bar{\epsilon}$ [m]	$D(\epsilon)$ [m]	$\bar{\epsilon}$ [m]	$D(\epsilon)$ [m]	$\bar{\epsilon}$ [m]	$D(\epsilon)$ [m]
MPC	5	0.64	-0.01	0.14	0.01	0.22	0.05	0.22
TargetPoint +aisan säätö	5	0.62	-0.42	0.15	-0.03	0.32	-0.27 (0.05)	0.30 (0.39)
TargetPoint	5	0.61	-0.39	0.32	0.12	0.45	NA (0.22)	NA (0.24)

Käyttäen TargetPoint-säädintä ilman aisan ohjausta, oikaisi työkone runsaasti verrattuna traktorin kulkemaan reittiin. Aisan ensimmäinen vapaa kulma muodostui niin jyrkäksi, ettei käytetyn kulman mittauslaitteen alue riittänyt kalibroinnin nollakohdan siirtymisen vuoksi. Tästä syystä RTK:n avulla ei voitu laskea työkoneen paikkaa.



Kuten aikaisemmin kuvista 42–44 nähtiin, työkone on keskiarvoisesti seurannut hyvin haluttua reittiä sekä MPC- että TargetPoint-säädintä käyttäen, kun aisan säätö on ollut käytössä. TargetPoint-säätimellä traktori on kuitenkin ajautunut ulkokurvin puolelle, kun se MPC säätimellä on pysynyt lähellä haluttua reittiä. Myös työkoneen virheen keskihajonta on MPC-säätimellä hieman pienempi kuin TargetPoint-säätimellä.

Mikä testiajojen tuloksista ei näy, on kuljettaman kokema ajotuntuma automaattiajossa. Yleisesti kaikissa testeissä ohjaus tuntui TargetPoint-säädintä käyttäen olevan kovin aggressiivinen. Varsinkin, jos laserskannerin lukemasta pellon profiilista ei löytynyt seurattavaa jälkeä kovin luotettavasti vaan löydetty paikka vaihteli, aisan ohjausliikkeet olivat rajuja. MPC-säädintä käyttäen vastaavanlaisia rajuja ohjausliikkeitä ei ilmennyt, kun säädin oli viritetty stabiiliksi. Kuitenkaan MPC-säädin ei ollut hitaampi reagoimaan polulla olleisiin muutoksiin.



## 5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän diplomityön tarkoituksena oli kokeilla ja kehittää traktorin ja työkonteen yhdistettyä navigointi-järjestelmää. Työ on tehty osana Farmix-tutkimusprojektia, jossa selvitettiin traktorin ja työkonteen integroidun ja syvennetyn automaation toteuttamiseen liittyviä haasteita ja kehittää sen mahdollistavia menetelmiä.

Työn pääpaino keskittyi polunseuranta-algoritmeihin. Myös muita navigointi-järjestelmässä tarvittavia algoritmeja käsiteltiin, mutta vain pintapuolisesti kokonaisjärjestelmän toimintaa saattamiseksi vaaditulla tarkkuudella. Kokeillut polunseuranta-algoritmit olivat tähtäyspistemenetelmä ja malliprediktiivinen säädin. Koska tähtäyspistemenetelmä on vain traktorin navigointiin tarkoitettu menetelmä, tehtiin myös erillinen säädin työkonteen ohjaukseen. Tähtäyspistemenetelmä näyttäisi vastaavan nykyisten kaupallisten autopilot-tuotteiden navigointi-algoritmeja.

Navigointi-järjestelmän suoritusalueena käytettiin kannettavaa tietokonetta ja säädinten suoritusympäristönä Matlab Simulink -ohjelmistoa. Traktorin ja työkonteen paikannuksessa käytettiin hyväksi RTK-GPS laitteistoa sekä 2D laserskanneria. Näin saatiin paikannettua navigoitavan työkonneyhdistelmän sijaintia sekä globaalissa koordinaatistossa että lokaalisti edellisten työjälkien suhteen. Navigoitavana työkonneyhdistelmänä olivat ISOBUS standardit täyttävän traktorin ja kylvölannoittimen prototyypit. Käytettyyn kylvölannoittimeen oli myös työn puitteissa lisätty aisaan ohjattava nivel.

Testiajoissa tarkasteltiin tähtäyspistemenetelmän ilman aisan ohjausta ja aisan ohjauksen kanssa sekä malliprediktiivisen säätimen eroja. Aisan ohjauksesta oli selvästi hyötyä verrattuna jäykkään aisaan, sillä työkonne saatiin kulkemaan paremmin traktorin kanssa samoja jälkiä. Lisäksi käyttämällä aisan ohjausta työkonteen paikkaa voitiin itsenäisesti korjata riippumatta traktorin ohjauksesta. Tällä tavoin säädin pystyi reagoimaan hieman nopeammin polulla oleviin muutoksiin sekä jo tapahtuneisiin navigointivirheisiin, kuten esimerkiksi päistekäännöksen jälkeen uudelle ajolinjalle siirtymisessä.



Testeissä ei saatu suuria eroja tähtäyspistemenetelmän ja malliprediktiivisen säätimen välille. Malliprediktiivisen säätimen kyky ennakoida tulevia muutoksia polulla teki siitä ehkä hieman rauhallisemman, mutta silti yhtä hyvin polkua seuraavan menetelmän. Säätimen virityksellä on myös hyvin suuri merkitys ohjauksen aggressiivisuuteen, mutta jos tähtäyspistemenetelmän vahvistusta olisi pienennetty, olisi myös sen seurantavirhe kasvanut. Koska malliprediktiivinen säädin käyttää säädössä useita eri mittauksia ja erosuureita, on eri menetelmien hyvyttä hieman hankala verrata toisiinsa. Kuitenkin malliprediktiivisessä säätimessä on potentiaalia tämän tyyppiseen tehtävään ja järjestelmää olisi syytä kehittää eteenpäin parempien tulosten saavuttamiseksi.

Myös aikaisemmin muiden tekemissä tutkimuksissa on saatu viitteitä malliprediktiivisen säätimen hyvydestä sen käytössä traktorin navigoinnissa. Aikaisemmissa tutkimuksissa ei kuitenkaan ole ollut mahdollisuutta ohjata myös työkoneen paikkaa traktorin suhteen. Tässä työssä on osoitettu, että traktorin ja työkoneen yhdistetty navigointi onnistuu käyttäen malliprediktiivistä säädintä ja että työkoneen aisan ohjauksen ansios- ta yhdistelmä on paremmin hallittavissa.

Koska järjestelmä on hyvin epälineaarinen, ei linearisoitu malli toiminut malliprediktiivisessä säätimessä mielestäni riittävän hyvin. Säätimen virittäminen stabiiliksi ja hyvin haluttua trajektoria seuraavaksi oli haastava työ. Erityisesti jyrkissä käännoksissä mallin linearisoinnista johtuvat virheet olivat huomattavia. Tämän vuoksi kannattaisi- kin käyttää epälineaarista malliprediktiivistä säädintä (NMPC). Malliin olisi hyvä sisällyttää myös toimilaitteiden dynamiikka sekä pellolla tapahtuvien luistojen mallinnus. Säiden epäsuotuisuuden ja aikataulullisten syiden vuoksi tätä lähestymistapaa ei päästy käytännössä kokeilemaan tämän diplomityön puitteissa.



## VIITTEET

- [1] Agco. Auto-Guide Accuracy. <http://www.falconcontroller.com/agco/AutoGuide/AutoGuideUK/AboutAutoGuide/Accuracy.htm>, Viitattu: 15.10.2008
- [2] Agco. Auto-Guide Version 4.2, Operator Manual. 2006. 240 s. Julkaisu No. 72571166A
- [3] Agrocom. Agrocom – the name for perfect farming, Hardware. <http://www.agrocom.com/index.php?a=106>, Viitattu: 15.10.2008
- [4] Amidi, Omead. Integrated Mobile Robot Control. Carnegie Mellon University. Pittsburgh, Pennsylvania. 1990. 39 s. Saatavissa: [http://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub3/amidi\\_omead\\_1990\\_1/amidi\\_omead\\_1990\\_1.pdf](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/amidi_omead_1990_1/amidi_omead_1990_1.pdf), Viitattu: 15.10.2008
- [5] Astolfi, A. & Bolzern, P. & Locatelli, A. Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: a Lyapunov-based approach. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2004, Vol. 20: 1. S. 154-160. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/70/28331/01266658.pdf>, Viitattu: 15.10.2008. DOI: 10.1109/TRA.2003.820928
- [6] Bemporad, Alberto & Morari, Manfred & Ricker, N. Lawrence. Model Predictive Control Toolbox 2 User's Guide. The MathWorks, Inc. 2008. 248 s. Saatavissa: [http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/mpc/mpc\\_ug.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/mpc/mpc_ug.pdf), Viitattu: 15.10.2008.
- [7] Bolzern, Paolo & DeSantis, Romano M. & Locatelli, Arturo & Masciocchi, Dario. Path-Tracking for Articulated Vehicles with Off-Axle Hitching. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1998, Vol. 6: 4. S. 515-523. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=701346&isnumber=15085>, Viitattu: 15.10.2008. DOI: 10.1109/87.701346
- [8] Farmix. Tutkimussuunnitelma. Hyväksytty johtoryhmän kokouksessa 10.5.2006. 13 s. [ei-julkinen]
- [9] Findeisen, Rolf & Allgöwer, Frank. An Introduction to Nonlinear Model Predictive Control. Book of Abstracts 21st Benelux Meeting on Systems and Control. Veldhoven, The Netherlands. 2002. S. 119-141. Saatavissa: <http://www.wfw.wtb.tue.nl/benelux2002/boa.pdf>, Viitattu: 15.10.2008. ISBN 90-386-2893-5



- [10] ISO 11783-7:2002. Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network – Part 7: Implement messages application layer. Geneve: International Organization for Standardization. 96 s.
- [11] John Deere. Accuracy equation explains how accuracy is derived.  
[http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/en\\_NA/ams/2009/feature/autotr ac/accuracy\\_equation.html](http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/en_NA/ams/2009/feature/autotr ac/accuracy_equation.html), Viitattu: 16.10.2008
- [12] John Deere. AutoTrack RowSense allows use of automatic guidance in corn.  
[http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/en\\_NA/ams/2009/feature/autotr ac/rowsense/product\\_description.html](http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/en_NA/ams/2009/feature/autotr ac/rowsense/product_description.html), Viitattu: 15.10.2008
- [13] John Deere. GS-2 Display – Basic Applications, Operator Manual.  
[http://manuals.deere.com/omview/OMPC20914\\_19/](http://manuals.deere.com/omview/OMPC20914_19/), Viitattu: 15.10.2008
- [14] John Deere. GS-2 Display – Guidance, Operator Manual.  
[http://manuals.deere.com/omview/OMPC20939\\_19/](http://manuals.deere.com/omview/OMPC20939_19/), Viitattu: 15.10.2008
- [15] John Deere. iTEC Pro, Operator Manual.  
[http://manuals.deere.com/omview/OMPC21038\\_19/](http://manuals.deere.com/omview/OMPC21038_19/), Viitattu: 15.10.2008
- [16] Kaivosoja, Jere. Traktorin automaattiohjauksen suorituskyvyn testausmenetelmien kehittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Maanmittausosasto. Espoo, syyskuu 2007. 84 s.
- [17] Lenain, Ronald & Thuilot, Benoit & Cariou, Christophe & Martinet, Philippe. Model Predictive Control for Vehicle Guidance in Presence of Sliding: Application to Farm Vehicle Path Tracking. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain. 2005. S. 885-890. Saatavissa:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1570229&isnumber=33250>, Viitattu: 15.10.2008.
- [18] Linja, Markus. Traktorin paikannuksen parantaminen sensorifuusiolla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto. Espoo, 5.4.2005. 62 s.
- [19] Moxa. NPort W2150, 2250 Plus Datasheet. 3 s. Saatavissa:  
[http://www.moxa.com/support/download.aspx?d\\_id=1544](http://www.moxa.com/support/download.aspx?d_id=1544), Viitattu: 16.10.2008
- [20] Posio, Jani. Malliprediktiivinen säätö. Oulun yliopisto, Säädotekniikan laboratorio. Raportti B No. 39. 2002. 25 s. Saatavissa:  
<http://herkules.oulu.fi/isbn9514275446/isbn9514275446.pdf>, Viitattu: 15.10.2008. ISBN 951-42-7544-6 (Painettu: ISBN 951-42-6887-3, ISSN 1238-9404)



- [21] Roth, S.A & Batavia, P.H.. Evaluating Path Tracker Performance for Outdoor Mobile Robots. Automation Technology for Off-Road Equipment. 2002. 10 s. Saatavissa: [http://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub4/roth\\_stephan\\_a\\_2002\\_1/roth\\_stephan\\_a\\_2002\\_1.pdf](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub4/roth_stephan_a_2002_1/roth_stephan_a_2002_1.pdf), Viitattu: 16.10.2008
- [22] Sick. LMS200/211/221/291 Laser Measurement Systems, Technical Description. 2006. 48 s. Saatavissa: <https://mysick.com/saqqara/get.aspx?id=im0012759&title=LMS+221-30206>, Viitattu: 16.10.2008
- [23] The MathWorks. Model Predictive Control Toolbox 3.0. <http://www.mathworks.com/products/mpc/>, Viitattu: 16.10.2008
- [24] The MathWorks. Real-Time Workshop 7.2. <http://www.mathworks.com/products/rtw/>, Viitattu: 16.10.2008
- [25] The MathWorks. Simulink – Simulation and Model-Based Design. <http://www.mathworks.com/products/simulink/>, Viitattu: 16.10.2008
- [26] Trimble. Trimble 5700 GPS Receiver, Datasheet. 2008. 2 s. Saatavissa: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-163620/022543-074E\\_5700\\_DS\\_0808\\_LR.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-163620/022543-074E_5700_DS_0808_LR.pdf), Viitattu: 16.10.2008
- [27] Trimble. Trimble – Agriculture – Guidance. <http://www.trimble.com/agriculture/guidance.aspx>, Viitattu: 15.10.2008
- [28] Vougioukas, Stavros G. Reactive Trajectory Tracking for Mobile Robots based on Non Linear Model Predictive Control. Proceedings of the 2007 IEEE International Conference of Robotics and Automation, Roma, Italy. 2007. S.3074-3079. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4209557&isnumber=4209049>, Viitattu: 15.10.2008. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363939
- [29] Wikipedia. Plücker coordinates. [http://en.wikipedia.org/wiki/Plücker\\_coordinates](http://en.wikipedia.org/wiki/Plücker_coordinates), Muokattu: 5.7.2008, Viitattu: 15.10.2008.
- [30] Wit, Jeff & Crane III, Carl D. & Armstrong, David. Autonomous Ground Vehicle Path Tracking. Journal of Robotic Systems, 21. 2004. S. 439-449. Wiley Periodicals, Inc. Saatavissa: <http://www3.interscience.wiley.com/journal/109087499/abstract>, Viitattu: 15.10.2008. DOI: 10.1002/rob.20031



## LIITE 1. Aisan ohjauskulman ratkaisu

Solve[(s - b) Sin[β] = (s - d) Sin[γ], s]

{ {s →  $\frac{b \sin[\beta] - d \sin[\gamma]}{\sin[\beta] - \sin[\gamma]}$  } }

Solve[ $\left( \frac{b \sin[\beta] - d \sin[\gamma]}{\sin[\beta] - \sin[\gamma]} - d \right) \sin[\beta + \gamma] = c \sin[\beta]$  /. {b → 1.7, c → 2.3, d → 3.3}, γ]

solve::ifun : Inverse functions are being used by solve, so some solutions may not be found; use Reduce for complete solution information. More...

{ {γ → -1. ArcCos[ $\left( 0.5 (-1. \sin[\beta]^2 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2) - 1. \sqrt{(\sin[\beta]^4 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2)^2 - 4. \sin[\beta]^2 (-2116. + 2944. \cos[\beta] - 1024. \cos[\beta]^2 + 2116. \sin[\beta]^2) (289. - 578. \cos[\beta]^2 + 289. \cos[\beta]^4 + 450. \sin[\beta]^2 - 2944. \cos[\beta] \sin[\beta]^2 + 2690. \cos[\beta]^2 \sin[\beta]^2 + 2401. \sin[\beta]^4)})} \right) \right)$  / (289. - 578. cos[β]<sup>2</sup> + 289. cos[β]<sup>4</sup> + 450. sin[β]<sup>2</sup> - 2944. cos[β] sin[β]<sup>2</sup> + 2690. cos[β]<sup>2</sup> sin[β]<sup>2</sup> + 2401. sin[β]<sup>4</sup>) ] } },  
 {γ → ArcCos[ $\left( 0.5 (-1. \sin[\beta]^2 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2) - 1. \sqrt{(\sin[\beta]^4 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2)^2 - 4. \sin[\beta]^2 (-2116. + 2944. \cos[\beta] - 1024. \cos[\beta]^2 + 2116. \sin[\beta]^2) (289. - 578. \cos[\beta]^2 + 289. \cos[\beta]^4 + 450. \sin[\beta]^2 - 2944. \cos[\beta] \sin[\beta]^2 + 2690. \cos[\beta]^2 \sin[\beta]^2 + 2401. \sin[\beta]^4)})} \right) \right)$  / (289. - 578. cos[β]<sup>2</sup> + 289. cos[β]<sup>4</sup> + 450. sin[β]<sup>2</sup> - 2944. cos[β] sin[β]<sup>2</sup> + 2690. cos[β]<sup>2</sup> sin[β]<sup>2</sup> + 2401. sin[β]<sup>4</sup>) ] } },  
 {γ → -1. ArcCos[ $\left( 0.5 (-1. \sin[\beta]^2 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2) + \sqrt{(\sin[\beta]^4 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2)^2 - 4. \sin[\beta]^2 (-2116. + 2944. \cos[\beta] - 1024. \cos[\beta]^2 + 2116. \sin[\beta]^2) (289. - 578. \cos[\beta]^2 + 289. \cos[\beta]^4 + 450. \sin[\beta]^2 - 2944. \cos[\beta] \sin[\beta]^2 + 2690. \cos[\beta]^2 \sin[\beta]^2 + 2401. \sin[\beta]^4)})} \right) \right)$  / (289. - 578. cos[β]<sup>2</sup> + 289. cos[β]<sup>4</sup> + 450. sin[β]<sup>2</sup> - 2944. cos[β] sin[β]<sup>2</sup> + 2690. cos[β]<sup>2</sup> sin[β]<sup>2</sup> + 2401. sin[β]<sup>4</sup>) ] } },  
 {γ → ArcCos[ $\left( 0.5 (-1. \sin[\beta]^2 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2) + \sqrt{(\sin[\beta]^4 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2)^2 - 4. \sin[\beta]^2 (-2116. + 2944. \cos[\beta] - 1024. \cos[\beta]^2 + 2116. \sin[\beta]^2) (289. - 578. \cos[\beta]^2 + 289. \cos[\beta]^4 + 450. \sin[\beta]^2 - 2944. \cos[\beta] \sin[\beta]^2 + 2690. \cos[\beta]^2 \sin[\beta]^2 + 2401. \sin[\beta]^4)})} \right) \right)$  / (289. - 578. cos[β]<sup>2</sup> + 289. cos[β]<sup>4</sup> + 450. sin[β]<sup>2</sup> - 2944. cos[β] sin[β]<sup>2</sup> + 2690. cos[β]<sup>2</sup> sin[β]<sup>2</sup> + 2401. sin[β]<sup>4</sup>) ] } } }

% /. β → 0.1

{ {γ → -3.04159}, {γ → 3.04159}, {γ → -0.543798}, {γ → 0.543798} }

f[β\_] := ArcCos[ $\left( 0.5 (-1. \sin[\beta]^2 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2) + \sqrt{(\sin[\beta]^4 (-1564. + 1564. \cos[\beta]^2 + 4508. \sin[\beta]^2)^2 - 4. \sin[\beta]^2 (-2116. + 2944. \cos[\beta] - 1024. \cos[\beta]^2 + 2116. \sin[\beta]^2) (289. - 578. \cos[\beta]^2 + 289. \cos[\beta]^4 + 450. \sin[\beta]^2 - 2944. \cos[\beta] \sin[\beta]^2 + 2690. \cos[\beta]^2 \sin[\beta]^2 + 2401. \sin[\beta]^4)})} \right) \right)$  / (289. - 578. cos[β]<sup>2</sup> + 289. cos[β]<sup>4</sup> + 450. sin[β]<sup>2</sup> - 2944. cos[β] sin[β]<sup>2</sup> + 2690. cos[β]<sup>2</sup> sin[β]<sup>2</sup> + 2401. sin[β]<sup>4</sup>) ]



```
FindRoot[f[x] = 0.3, {x, 0.05}]
```

```
{x → 0.0542404}
```

```
x = Range[0.0001, 0.05424036609943061, 0.001];
```

```
y = f[x];
```

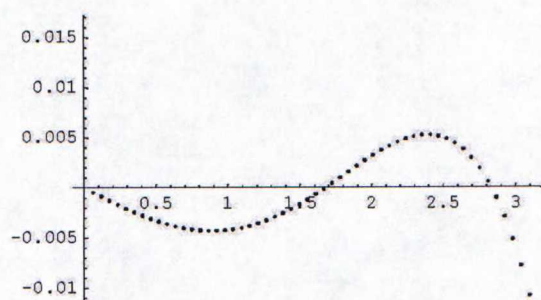
```
DD = Transpose[{x, y} / Pi * 180];
```

```
eqq = Fit[DD, {z, z^3}, z]
```

```
5.5713 z - 0.0041855 z^3
```

```
ListPlot[Transpose[{x / Pi * 180, ((eqq /. z → (x / Pi * 180)) - (y / Pi * 180)) / Pi * 180}]]
```

```
- Graphics -
```



```
- Graphics -
```



## LIITE 2. Kinemaattisen mallin kaavojen ratkaisu

```

xF[t_] := xR[t] + a * Cos[θ[t]];
yF[t_] := yR[t] + a * Sin[θ[t]];
xC[t_] := xR[t] - b * Cos[θ[t]];
yC[t_] := yR[t] - b * Sin[θ[t]];
xD[t_] := xC[t] - c * Cos[θ[t] - β[t]];
yD[t_] := yC[t] - c * Sin[θ[t] - β[t]];
xE[t_] := xD[t] - d * Cos[θ[t] - β[t] - γ[t]];
yE[t_] := yD[t] - d * Sin[θ[t] - β[t] - γ[t]];
xL[t_] := xD[t] - l * Cos[θ[t] - β[t] - γ[t]];
yL[t_] := yD[t] - l * Sin[θ[t] - β[t] - γ[t]];
dL'[t_] := -xL'[t] * Sin[θ[t] - β[t] - γ[t]] + yL'[t] * Cos[θ[t] - β[t] - γ[t]];

```

```

Solve[{xR'[t] * Cos[θ[t]] + yR'[t] * Sin[θ[t]] = v,
  -xR'[t] * Sin[θ[t]] + yR'[t] * Cos[θ[t]] = 0,
  -xF'[t] * Sin[θ[t] + α] + yF'[t] * Cos[θ[t] + α] = 0,
  -xE'[t] * Sin[θ[t] - β[t] - γ[t]] + yE'[t] * Cos[θ[t] - β[t] - γ[t]] = 0},
{θ'[t], β'[t], xR'[t], yR'[t]}]

```

```

{{β'[t] → - 1 / (2 a (d + c Cos[γ[t]])) (Sec[α] (-2 d v Sin[α] - c v Sin[α - γ[t]] - a v Sin[α - β[t] - γ[t]] -
  b v Sin[α - β[t] - γ[t]] - c v Sin[α + γ[t]] + a v Sin[α + β[t] + γ[t]] -
  b v Sin[α + β[t] + γ[t]] + 2 a d Cos[α] γ'[t])),
  θ'[t] → v Tan[α] / a, xR'[t] → v Cos[θ[t]], yR'[t] → v Sin[θ[t]]}}

```

```
FullSimplify[%]
```

```

{{β'[t] → (-a v Sin[β[t] + γ[t]] + v (d + c Cos[γ[t]] + b Cos[β[t] + γ[t])) Tan[α] - a d γ'[t]) /
  (a (d + c Cos[γ[t]])),
  θ'[t] → v Tan[α] / a, xR'[t] → v Cos[θ[t]], yR'[t] → v Sin[θ[t]]}}

```

```

β'[t_] :=
  (-a v Sin[β[t] + γ[t]] + v (d + c Cos[γ[t]] + b Cos[β[t] + γ[t])) Tan[α] - a d γ'[t] /
    a (d + c Cos[γ[t]]);

```

```
θ'[t_] := v Tan[α] / a;
```

```
xR'[t_] := v Cos[θ[t]];
```

```
yR'[t_] := v Sin[θ[t]];
```

```
FullSimplify[dL'[t]]
```

```

1 / (a (d + c Cos[γ[t]])) ((d - 1) (v (Cos[γ[t]] (a Sin[β[t]] - b Cos[β[t]] Tan[α]) +
  Sin[γ[t]] (a Cos[β[t]] + b Sin[β[t]] Tan[α])) - a c Cos[γ[t]] γ'[t]))

```